

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské  
metrologie

**Návrh technologie obrábění tvrdonávarů a kalených ocelí**

Design of Machining Hardened Steels and Hardened Layers after  
Welding

Student:

Bc. Michal Ledvina

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D

Ostrava 2019

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Ledvina**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Téma: **Návrh technologie obrábění tvrdonávarů a kalených ocelí**  
**Design of Machining Hardened Steels and Hardened Layers after**  
**Welding**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Rozbor obrábění tvrdonávarů a kalených ocelí.
3. Návrh experimentální části.
4. Technicko-ekonomické zhodnocení.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:


MASLOV, J. N. Teorie broušení kovů. Praha : SNTL, 1979. 248 s.  
BUDA, J.; BÉKÉS, J. Teoretické základy obrábění kovů. 2. vyd. Bratislava : ALFA, 1967.  
BUDA, J.; SOUČEK, J.; VASILKO, K. Teória obrábění. Bratislava : ALFA, 1988.  
HAVRILA, M.; ZAJAC, J.; BRYCHTA, J.; JURKO, J. *Top trendy v obrábění, I. část – Obráběné materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 205 s. ISBN 80-968954-2-7.  
ZAJAC, J.; JURKO, J.; ČEP, R. *Top trendy v obrábění, II. část – Nástrojové materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 193 s. ISBN 80-968954-2-7.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

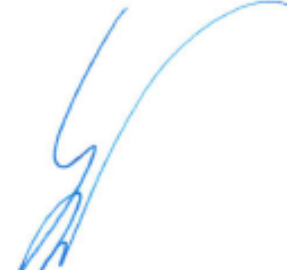
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

  
doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### **Mistopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 20.5.2019



podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20.5.2019



podpis

Jméno a příjmení autora diplomové práce:

Bc. Michal Ledvina

Adresa trvalého pobytu autora práce:

I. Máje 42, Olomouc

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

LEDVINA, Michal. Návrh technologie obrábění tvrdonávarů a kalených ocelí. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2019, 59s. Vedoucí práce Zlámal, T.

Diplomová práce se zabývá problematikou obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Konkrétně kalených nástrojových ocelí pro výrobu zápustkových forem a tvrdonávaru Capilla 66 dosahujícího tvrdosti až 56 HRC, který se používá pro opravu opotřebovaných zápustek. V teoretické části jsou popsány jednotlivé těžkoobrobitelné materiály, progresivní technologie obrábění jako je HSC, HSC nebo tzv. suché frézování a druhy nástrojových materiálů. V praktické části je popsána výroby a oprava kovárenských zápustkových zařízení, racionalizace jejich životnosti pomocí tvrdonávaru Capilla 66 a návrh a experiment nové technologie pro obrábění tohoto návaru. V závěru práce je ekonomické zhodnocení nové technologie opravy zápustek tvrdonávarem v porovnání s původní metodou snížením o 5 mm

## **ANOTATION OF MASTER THESIS**

LEDVINA, Michal. Design of Machining Hardened Steels and Hardened Layers after Welding. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2019, 59p, Thesis head: Zlámal, T.

The thesis deals with the issue of machining hard-to-cut materials. Specifically, hardened tool steels for die molds and hardened layers after welding from Capilla 66 with hardness up to 56 HRC, which is used to repair worn dies. In the theoretical part, there are described individual hard-to-process materials, progressive machining technologies such as HSC, HSC or so-called dry milling and kind of tool materials. The practical part describes the production and repair of blacksmith die systems, their lifetime extension by means of Capilla 66 hardened layers after welding and the design and experiment of a new technology for machining this hardweld. The conclusion of the thesis contains an economic evaluation of the new technology of dies restoration by hardened layers after welding in comparison with the original method of 5 mm dimension reductio

## Obsah

Seznam použitých značek a symbolů:.....	8
Úvod.....	9
1    Úvod do obrábění těžkoobrobitelných materiálů .....	10
1.1    Obrobitelnost těžkoobrobitelných materiálů .....	10
1.2    těžkoobrobitelné materiály .....	13
2    Rozbor obrábění tvrdonávarů a kalených ocelí .....	17
2.1    Materiály řezných nástrojů .....	17
2.1.1    Slinuté karbidy .....	18
2.1.2    Řezná keramika .....	19
2.1.3    Cermety .....	20
2.1.4    Supertvrde řezné materiály .....	20
2.2    Volba řezných podmínek .....	21
2.3    Technologie vhodné pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů .....	22
2.3.1    Abrazivní technologie obrábění .....	22
2.3.2    HSC – vysokorychlostní obrábění .....	23
2.3.3    HFC a HPC obrábění .....	26
2.3.4    Suché a kvazisuché obrábění .....	27
2.3.5    Tvrde obrábění .....	27
2.3.6    NMO – Elektroerozivní obrábění (EDM) .....	28
3    Návrh experimentální části.....	29
3.1    Výroba nových zápusťkových zařízení .....	29
3.2    Obnova poškozených zápusťek .....	33
3.3    Návrh nové technologie opravy zápusťek a experimentu .....	35
3.3.1    Původní technologie opravy zápusťky .....	37

3.3.2	Experimentální návrh nových nástrojů .....	38
3.3.3	Návrh nové technologie obnovy zápustek .....	48
4	Technicko – ekonomické zhodnocení .....	52
	Závěr .....	54
	Použité zdroje.....	55
	Seznam příloh.....	58

## Seznam použitých značek a symbolů:

Symbol	Popis	Jednotka
$R_m$	mez pevnosti	[MPa]
PVD	nanášení odpařením z pevné fáze	
CVD	chemická depozice z plynné fáze	
SK	slinutý karbid	
$VB_B$	opotřebení přímé části ostří	[mm]
VBD	vyměnitelná břitová destička	
$v_c$	řezná rychlost	[m.min <sup>-1</sup> ]
$a_p$	hloubka záběru třísky	[mm]
$a_e$	pracovní záběr	[mm]
$f_z$	posuv na zub	[mm]
HSC	vysokorychlostní obrábění	
HFC	vysokoposuvové obrábění	
HPC	vysokovýkonné obrábění	
PCBN	polykristalický kubický nitrid boru	
ŘK	řezná keramika	
PKD	polykristalický diamant	
NMO	nekonveční metody obrábění	
EDM	elektroerozivní obrábění	



## Úvod

Technologický pokrok jde stále kupředu. Vývoj nových technologií, postupů a materiálů nabírá stále rychlejší tempo. Strojírenství v tomto ohledu patří k velice dynamickému odvětví. Pokrok ve strojírenství klade důraz na vývoj stále lepších materiálů, které vynikají skvělými vlastnostmi jako je vysoká tvrdost, otěruvzdornost, únavová stálost, houževnatost, žárovevnost, žáruvzdornost, korozivzdornost a mnohé další.

Mezi tyto materiály můžeme zařadit kalené a popuštěné oceli, cementované oceli, litiny nebo slitiny na bázi kobaltu, niklu nebo titanu, které se používají v kosmonautice, letectví a chemickém průmyslu. Excelentní vlastnosti, kterých tyto materiály dosahují, přinášejí problémy s jejich obráběním. Zhoršují jejich obrobiteľnost a kladou větší důraz na soustavu stroj – nástroj – přípravek – obrobek. Musí se tedy volit dostatečně tuhý stroj, vhodná technologie, vhodný nástrojový materiál, řezné podmínky a geometrie nástroje.

Cílem mé diplomové práce je volba nové technologie a nástrojů pro obrábění kalených zápustek, a především tvrdonávarů kovárny firmy Unex a.s. – závod Olomouc. Tyto tvrdé návary výrazně zvyšují životnost nástrojů k zápustkovému kování, ale i zhoršují a prodražují jejich výrobu třískovým obráběním. V celkovém měřítku, by však měli být přínosem a snižovat výrobní náklady na výrobu výkovků.

# 1 Úvod do obrábění těžkoobrobitelných materiálů

Současný rychlý rozvoj techniky si vyžaduje i potřebný vývoj nových konstrukčních materiálů. Na tyto materiály jsou kladeny vysoké nároky ohledně jejich odolnosti proti korozi, pevnosti za tepla i za studena, fyzikálně – chemické či mechanické vlastnosti. Antikorozi a žáruvzdorné oceli obsahují legující prvky jako Ni, Ti, Mo, W, a další. Tyto materiály si zachovávají vysokou pevnost  $R_m$  i za vysokých teplot. Speciální oceli do 700 °C, slitiny na bázi niklu do 1100 °C a slitiny na bázi wolframu dokonce do teploty 2000 °C. Při obrábění těchto materiálů je tedy nutné správně určit jejich obrobitelnost a zohlednit toto zjištění při určování vhodné technologie obrábění, nástrojů a jejich řezných podmínek. [1]

## 1.1 Obrobitelnost těžkoobrobitelných materiálů

Jelikož mají vlastnosti materiálu obrobku důležitý význam pro určení správných technologických podmínek obrábění, byl vytvořen pojem „obrobitelnost“. Obrobitelnost je vliv fyzikálních a chemických vlastností obráběného materiálu na proces řezání a tím pádem i kvalitativního a ekonomického výsledku obrábění. Určuje tedy vhodnost a způsobilost daného materiálu být zpracováván některou z metod třískového obrábění. [2] Obrobitelnost materiálu nejvíce ovlivňují následující skutečnosti:

- fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného povrchu,
- chemické složení obráběného materiálu,
- mikrostruktura obráběného materiálu,
- technologie výroby a druh tepelného zpracování obráběného materiálu,
- metoda obrábění,
- pracovní prostředí,
- geometrie řezného nástroje,
- řezné podmínky obrábění,
- druh nástrojového materiálu,
- kinematika obrábění. [3]

Obrobitelnost materiálu je relativní vlastností. Její příslušnost do skupiny (a – v) a třídy obrobitelnosti se určí porovnáním s etalonovým materiálem, obráběným stejnou technologií, nástrojem řeznými podmínky a dalšími parametry. Hodnocení obrobitelnosti lze tedy provádět na základě porovnání:

- řezné rychlosti,
- drsnosti obrobené plochy,
- míry opotřebení nástroje,
- dosažené teploty řezání,
- typu tvořící se třísky,
- množství energie potřebné k úběru daného množství materiálu. [3]

Za tvrdé materiály lze obecně považovat materiály, které dosahují tvrdost 50-60 HRC. Pro srovnání tvrdostí těchto materiálů slouží následující tabulka:

*Tabulka 1 - Tvrdosti vybraných materiálů [4]*

materiál	tvrdost [HRC]
bílá/legovaná litina	50-61
výkonná rychlořezná ocel	64-69
nástrojová ocel	50-67
ocel na kuličková ložiska	56-67
tepelně zpracovaná ocel	50-56
cementovaná a kalená ocel	52-66

**Podle normy ČSN ISO 513 se obráběné materiály dělí:**

- **ISO P** – Do této skupiny je zařazeno velké množství materiálů od nelegovaných, nízkolegovaných až po vysocilegované oceli včetně ocelí na odlitky. Dále také feritické a korozivzdorné oceli. Obrobitelnost těchto materiálů je dobrá, ale liší se v závislosti na obsahu uhlíku, tvrdosti atd. [5]
- **ISO M** – Jedná se o korozivzdorné materiály. To znamená takové, které obsahují alespoň 12 % chromu a menší procento dalších legur jako například nikl a molybden. Tyto slitiny se dále dělí na feritické, martenzitické, austenitické či duplexní. Nástroje

obrábějící tyto materiály jsou vystaveny působení velkého tepla, tvorbě nárůstku a dochází k opotřebení ve tvaru vrubu. [5]

- **ISO K** – Zde řadíme litiny. Při obrábění litin se tvoří krátké, drobné třísky. Jejich obrobitelnost je závislá na druhu litiny. Nejobtížnější je obrábění modulární, vermikulární a izotermicky kalené litiny. Šedá a tepmperovaná litina, se oproti ním obrábí daleko jednodušeji. Problémem u obrábění všech litin je SiC, který obsahují, protože ten působí velmi abrazivně na břit nástroje. [5]
- **ISO N** – Neželezné kovy jako je hliník, mosaz, měď a další. Jsou měkčí, tím pádem se používají břitové destičky s ostrými břity a tudíž lze používat vysoké řezné rychlosti. Dosahuje se zde dobré životnosti nástrojů. [5]
- **ISO S** – V této skupině jsou zahrnuty žárovzdorné slitiny vysocelegovaných materiálů na bázi železa, niklu, kobaltu, a titanu. Problémy, které nastávají při jejich obrábění jsou tvorba nárůstku, mechanické zpevňování a vznik velkého množství tepla. Obrobitelnost je horší než u obrábění korozivzdorných materiálů a tím pádem i životnost ostří nástrojů je menší. [5]
- **ISO H** – Tato skupina zahrnuje materiály vyznačující se vysokou tvrdostí 45-65 HRC a tvrzené litiny o tvrdosti 400-600 HB. Z důvodu těchto vysokých tvrdostí je obrobitelnost obtížná, vzniká velké množství tepla a vysoké abrazivní opotřebení. [5]
- **Neobsažené v ISO** – Sem patří ostatní nekovové materiály jako kompozity z uhlíkových vláken, různé druhy plastů, polymery/plasty vyztužené skelnými vlákny, grafit, tvrdé pryže atd. [5]

 <p>Steel</p>	 <p>Stainless steel</p>	 <p>Cast iron</p>	 <p>Non ISO</p>
 <p>Non-ferrous metal</p>	 <p>Super-alloys and titanium</p>	 <p>Hard material</p>	

Obr. 1 - rozdělení materiálů dle ISO 513 [5]

## 1.2 těžkoobrobitelné materiály

Stále častěji používané těžkoobrobitelné materiály vyznačující se vysokou pevností a tvrdostí způsobenou převážně tepelným zpracováním nebo přidáním legujících prvků do základního materiálu dělíme na základě parametrů, jako je obrobitelnost, chemické složení, struktura materiálu či účel a druh použití do následujících skupin: [2]

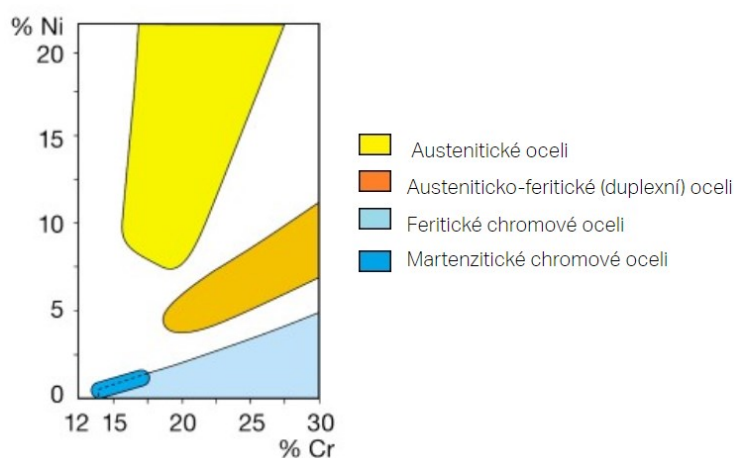
### 1) Oceli stále za tepla

Jedná se o oceli, které obsahují do 6 % chromu, 3 % niklu, 0,6 % molybdenu, 0,8 % vanadu a 2 % Si. křemíku. Tyto oceli nejsou rozrušovány a deformovány napětím vzniklým vlivem působení teploty do 550 °C a na jejich povrchu nevznikají žádné okuje. Obrobitelnost je zde podobná jako u nízkolegovaných konstrukčních ocelí. Použití nacházejí při výrobě spalovacích motorů, lopatek a disků turbín nebo dílů parních kotlů. [1]

### 2) Korozi-vzdorné oceli

Hlavním aspektem toho, jakou budou mít korozi-vzdorné oceli mikrostrukturu je obsah niklu a chromu ve slitině (viz. Obr. 1). Nelze však říct, že by to byl jediný činitel ovlivňující výslednou mikrostrukturu. Vliv mají také ostatní legující prvky, tepelné zpracování nebo i tváření za studena. [5]

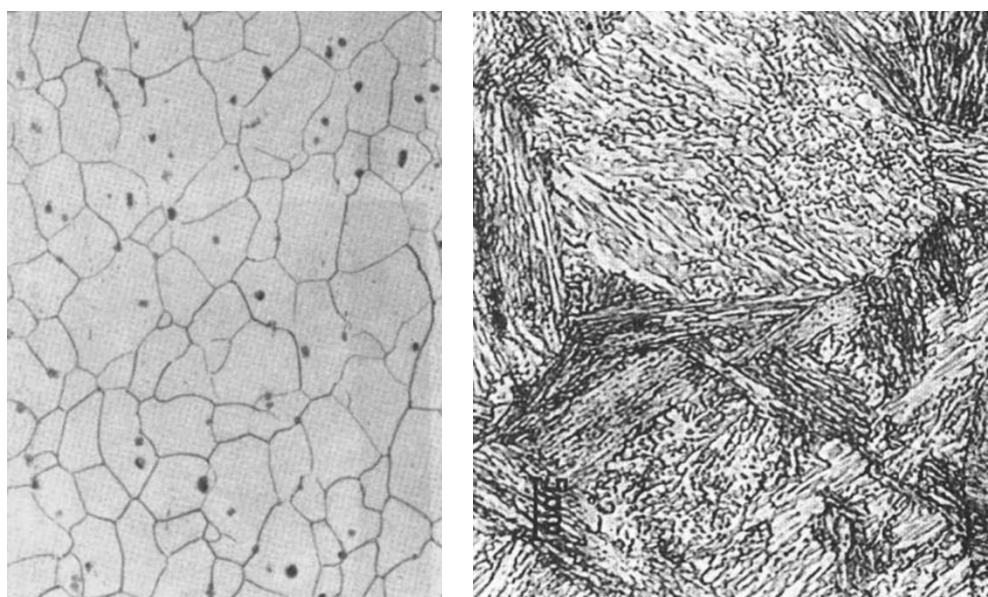
Vyznačují se tedy především vysokým obsahem chromu (nad 12 %) a niklu. Ostatní legující prvky jsou v těchto ocelích zastoupeny do 4 %. Hlavní předností je odolnost proti elektrochemické korozi. Při dostatečném obsahu uhlíku, lze tyto oceli kalit až na pevnost 1600 MPa. [1] Odolnost proti korozi se zvyšuje s rostoucím obsahem chromu. Vlastnosti korozi-vzdorných ocelí jsou závislé i na obsahu dalších legujících prvků a struktuře materiálu. dle vytvořené struktury je lze dělit na feritické, martenzitické a austenitické. [4]



Obr. 2 - Vliv Ni a Cr na mikrostrukturu korozi-vzdorné oceli [5]

Feritické korozivzdorné oceli obsahují pouze malé množství uhlíku (0,1 – 0,25 %). Hlavním legujícím prvkem je zde chrom. V menším množství molybden, mangan a křemík. Tyto oceli nejsou kalitelné, ale vyznačují se dobrou obrobitelností. [4]

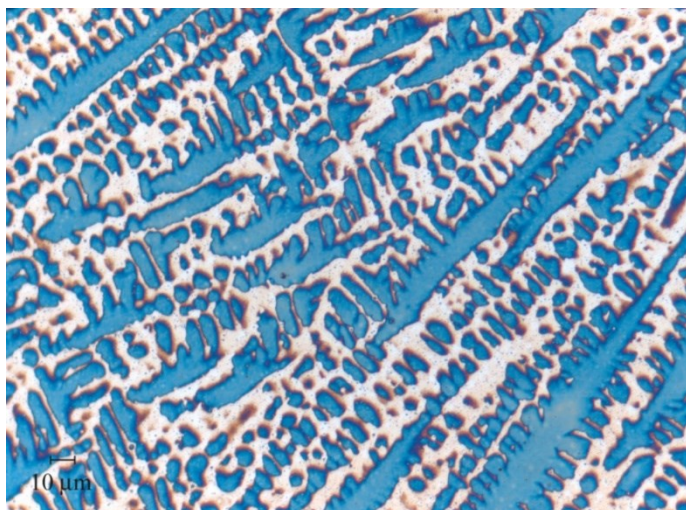
Martenzitické korozivzdorné oceli obsahují 0,2 – 1 % uhlíku a jsou proto kalitelné na martenzitickou strukturu. Obsahují tedy velké množství tvrdých karbidů, které mají silně abrazivní účinek a tím dosahují obtížné obrobitelnosti. Tomu se předchází tak, že pro obrábění jsou tyto oceli žíhány na měkko nebo zušlechtěny a ke kalení dochází až po opracování. [4]



*Obr. 3 - Feritická (vlevo) a martenzitická (vpravo) mikrostruktura korozivzdorné oceli [6]*

### **3) Žárovzdorné oceli**

Mezi tyto oceli se řadí austenitické, austeniticko-feritické či austeniticko-martenzitické oceli. Obsahují převážně velké množství chromu (nad 15 %) a niklu (nad 5 %). Jejich předností je korozivzdornost, kyselinovzdornost a žárovzdornost – to znamená, že jsou schopné odolávat chemickému poškození v plynném prostředí při teplotě do 550 °C. Využívají se pro výrobu lopatek kompresorů, parních trubek či jiných součástek, které pracují v podmínkách vysokých teplot (do 800 °C). [1] Obrobitelnost je obtížnější z důvodu malé tepelné vodivosti a vysokému efektu zpevňování zastudena, který způsobuje vznik míst s vysokou povrchovou tvrdostí. Taktéž mají sklon ke vzniku nárůstků na břitu nástroje, což vede ke zhoršení jakosti povrchu nebo až k samotnému lomu nástroje. [4]



*Obr. 4 - austenitická mikrostruktura žárupevné oceli [6]*

#### **4) Žárupevné oceli**

Jsou to oceli použitelné při vysokých teplotách nad 700 °C při zatíženém stavu. To znamená, že při zatíženém stavu a po stanovenou dobu, se na jejich povrchu nevytváří žádné okuje. Patří sem převážně legované austenitické oceli obsahující 12–25 % chromu, nad 5 % niklu a menší množství legur Mn, Mo, Ti, W a V. Použití nacházejí jako lopatky plynových turbín nebo díly pro rozvod plynu. Jejich obrobiteľnosť je 3 až 4x horší než u středně uhlíkové oceli. [1]

Dále zde patří oceli na bázi Ni nebo Ni – Fe s obsahem Cr a dalšími prvky (Ti, Al, W, Mo). Ty se používají pro velmi namáhané součástky pracující až při teplotách 950 °C. Obrobiteľnosť těchto ocelí je 6 – 12x horší než u středně uhlíkové oceli. [1]

#### **5) Vysokopevné oceli**

Tyto oceli se vyznačují vysokou pevností  $R_m = \text{nad } 1600 \text{ MPa}$ . Ta je způsobena především kalením a popouštěním. Pokud jsou v žíhaném stavu, jejich obrobiteľnosť je podobná jako u konstrukčních ocelí. Po vytvrzení kalením se obrobiteľnosť 5 až 8krát zhoršuje. Z tohoto důvodu je třeba volit přídavky po kalení co nejmenší. Pro obrábění se volí především nástroje ze slinutých karbidů. [1]

#### **6) Cementované oceli**

Mezi samostatnou podskupinu těžkoobrobitelných materiálů se řadí oceli po kalení a cementování. Tyto oceli, které jsou na povrchu nasyceny vrstvou uhlíku a dosahují tvrdosti 60-62 HRC. Obrábění je nejčastěji prováděno broušením. U broušení cementovaných ocelí je nutné dodržet správnou technologii. V případě nedodržení může dojít k rychlému ohřevu,

který způsobí lokální popuštění a tím snížení tvrdosti. Dalším problémem, který se z důvodu špatného broušení vyskytuje je vznik trhlin v povrchové vrstvě. [2]

## **7) Slitiny železa a dalších prvků**

Na moderní materiály jsou kladeny vysoké nároky na korozivzdornost, žárovevnost či další vlastnosti, které již nelze zajistit vysocelegovanými austenitickými ocelmi, a proto vznikla řada slitin, ve kterých je železo obsaženo pouze v malé míře několika procent. [2]

Jedná se například o slitiny niklu a chromu nebo niklu a kobaltu, které obsahují až 60 % kobaltu a až 30 % chromu. Velmi vysokou odolností proti korozi se vyznačují slitiny niklu a mědi. Tyto materiály mají zhoršenou obrobiteľnosť z důvodu tvrdosti a stříhové pevnosti po vytvrzení, což má za následek potřebu velkých řezných sil a zvýšenou teplotu v místě řezu. Dalším problémem jsou karbidy nacházející se ve struktuře materiálu, jelikož způsobují abrazivní opotřebení břitu. [2]

Titan a titanové slitiny mají kromě výše uvedených problémů ještě vysokou afinitu k uhlíku a malou tepelnou vodivost. To ještě zvyšuje mechanické a tepelné namáhání břitu a zhoršuje obrobiteľnosť. [2] Při teplotách nad 600 °C titan aktivně reaguje s plyny, nejvíce s kyslíkem. Pokud je slitina nasycená kyslíkem, její mikrotvrdost výrazně roste – 3 až 5krát oproti základnímu materiálu. [1]

## **8) Litiny**

Litina je slitinou železa a uhlíku (ve formě grafitu) s obsahem uhlíku nad 2 %. Dalšími legurami v litinách jsou křemík, mangan, fosfor a síra, ke zlepšení tepelné odolnosti a korozivzdornosti se používají ještě molybden, nikl, chrom a měď. Litiny se vyznačují především dobrou tuhostí a pevností. [4]

Z hlediska obrobiteľnosti je nutné zohlednit a jaký druh litiny se jedná. Například perlitická litina je tvrdší, a proto se obrábí hůře než ostatní. Při obrábění šedé litiny vzniká krátká, drobná tříška. Oproti tomu tvárná a temperovaná vytvářejí dlouhou třísku. Obecně však platí, že čím má litina větší pevnost a tvrdost, tak je její obrobiteľnosť horší. [4]

## **9) Tvrdonávary**

Tyto návary se používají na renovaci a obnovu velmi namáhaných ploch ocelí. Elektrody nebo přídavné dráty používané při těchto návarech obsahují velké množství legujících prvků jako Chrom, Vanad, Molybden, Mangan, Titan wolfran a další. Tím jsou zaručeny vlastnosti na svar kladené, především vysoká tvrdost a odolnost proti abrazivnímu (kov – písek, kov – zemina atd.) a adhezivnímu opotřebení (kov – kov). [7]

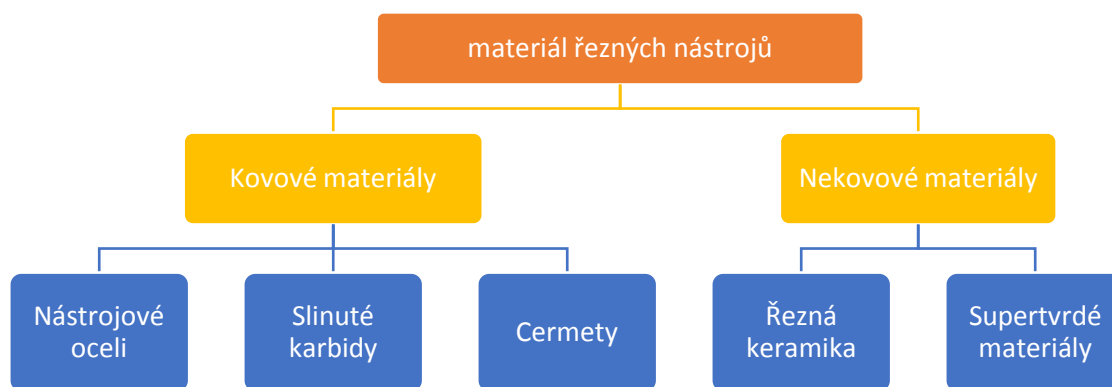


## 2 Rozbor obrábění tvrdonávarů a kalených ocelí

Proces obrábění se realizuje pomocí soustavy stroj – nástroj – přípravek – obrobek a výsledkem vzájemného působení je obrobený povrch. V současnosti vyvíjené moderní materiály kladou stále větší nároky na materiály řezných nástrojů, zhoršují jejich trvanlivost a životnost. Náklady na řezné nástroje se na celkových nákladech na obrábění podílejí 5 %. Z těchto důvodů je potřeba klást na správnou volbu nástrojů důraz. [8]

### 2.1 Materiály řezných nástrojů

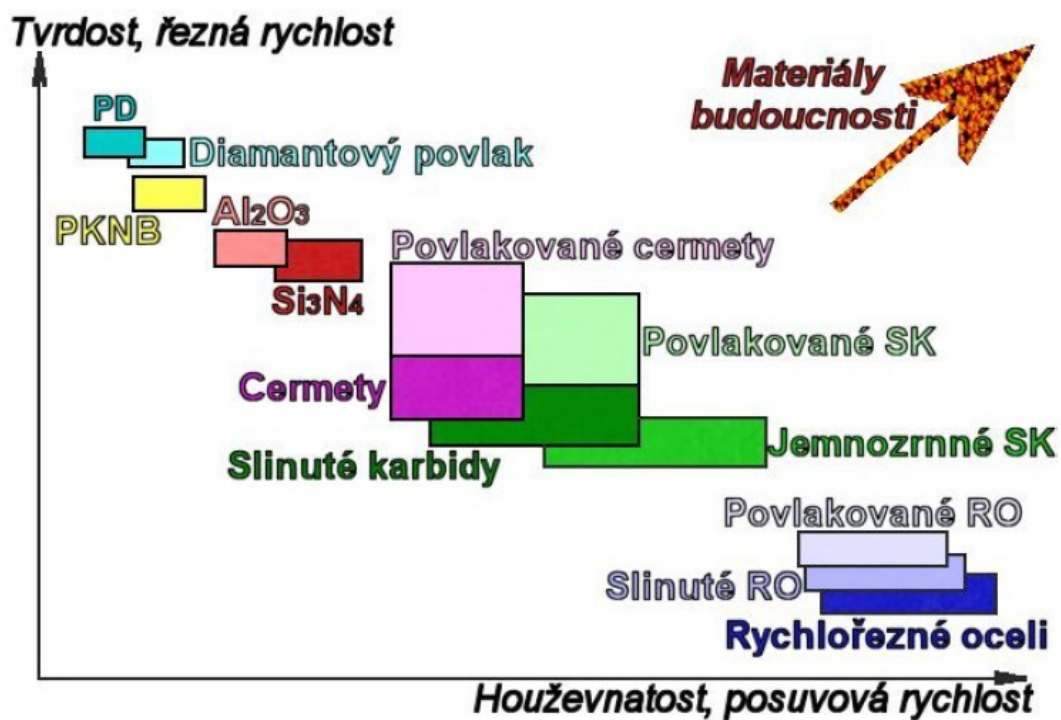
Mezi vlastnosti kladené na nástroje patří jejich vysoká tvrdost, houževnatost, odolnost proti opotřebení, tepelná vodivost a pevnost v ohybu. Tyto požadavky by měl řezný materiál splňovat při vysokých teplotách, řezném výkonu a úběru po dostatečně dlouhou dobu. [9]



Obr. 5 - Rozdělení materiálů řezných nástrojů [8]

Materiály řezných nástrojů se stále vyvíjejí. Mezi hlavní vývojové směry řadíme:

- vývoj materiálů řezných částí s velmi vysokou tvrdostí – tvrdé povlakované slinuté karbidy, cermety, supertvrdé materiály (diamant, kubický nitrid boru), tvrdé řezné keramiky,
- zlepšování otěruvzdorných povlaků – PVD nebo CVD jedno i vícevrstvé povlaky, povlakování diamantem či kubickým nitridem boru,
- vhodnější konstrukce nástrojů – vyměnitelné hroty osových a tvarových nástrojů, kombinované nástroje,
- nové geometrie a tvary vyměnitelných břitových destiček,
- vývoj nových tvarů lamačů a utvářečů třísek. [8]



Obr. 6 - Oblast použití řezných nástrojů s ohledem na materiál [10]

### 2.1.1 Slinuté karbidy

Jedná se o řezné materiály, které jsou vyráběny metodou práškové metalurgie. To znamená míšením, lisováním a slinováním výlisků tvrdého karbidového prášku a jejich pojiva. Základním karbidem pro jejich výrobu je karbid wolframu. Mezi další tvrdé, karbidové prvky přidávané do směsí pro zlepšení vlastností jsou karbid titanu, tantalu, niobu a chromu. Jako pojivo se používá kobalt. [11]

Požadavkem na slinuté karbidy (SK) je dosáhnout co nejlepší otěruvzdornosti, tvrdosti, pevnosti v tlaku/tahu a houževnatosti. Tyto vlastnosti se však navzájem vylučují, a proto je vhodné hledat co nejlepší kompromis. Lepší struktury se kromě chemického složení dosahuje také rovnoměrností výsledné struktury a velikostí zrn. [11]

V porovnání s rychlořeznou ocelí mají slinuté karbidy 2 – 3x vyšší tepelnou vodivost, mnohem vyšší tvrdost, která je stálejší v závislosti na pracovní teplotě a vyšší pevnost v tlaku a ohybu. Nevýhodou SK je jejich náchylnost ke křehkému lomu. [11]

Velkým přínosem ve vývoji řezných nástrojů bylo zavedení povlakování SK. Jedná se o metodu nanášení povlaků na podkladové SK pomocí některé z technologií PVD nebo CVD povlakování. Ty mohou být buď jednovrstvé – povlak TiC, TiCN, TiN nebo i vícevrstvé,

kdy je jsou jako první nanášeny povlaky, které mají dobrou přilnavost k základnímu materiálu SK a na ně jsou poté nanášeny další vrstvy zlepšující jejich tvrdost a ořezuvzdornost. V dnešní době existují i diamantové nebo KNB povlaky. [11]

Hlavní výhodou povlakovaných SK je tedy zvýšení jejich odolnosti proti opotřebení, tepelné stability a tvrdosti, a to při zachování dostatečné houževnatosti jádra SK. Používají se hlavně ve formě VBD. [11]

### 2.1.2 Řezná keramika

Keramické materiály jsou v porovnání se slinutými karbidy více stabilní při vysokých teplotách, kterých se dosahuje při obrábění vysokými řeznými rychlostmi, ale jsou náchylnější na křehký lom. [12] Mezi jejich další výhody patří odolnost proti abrazivnímu opotřebení či chemická odolnost. Základ chemické struktury těchto materiálů tvoří elektricky vyrobený korund  $Al_2O_3$ , což je vysoce tvrdý materiál, ale kromě tvrdosti je i velmi křehký. Z tohoto důvodu se do keramických řezných materiálů přidává nikl, molybden a chrom, které zvyšují jejich houževnatost. Dále se přidávají i karbidy titanu molybdenu a wolframu. [9] Existují následující skupiny řezné keramiky:

- Čistá (bílá) keramika – je to keramika na bázi oxidu hlinitého  $Al_2O_3$ . Pro zlepšení jejich vlastností se přidává oxid zirkonu  $ZrO_2$ . Ten zlepšuje lomovou houževnatost, ale snižuje tvrdost a vodivost. Nástroje z tohoto materiálu se používají k obrábění litiny, ty s vyšším obsahem  $ZrO_2$  pro obrábění ocelí. [12]
- Keramika na bázi nitridu křemíku – tento materiál je tvrdší než čistá keramika, má lepší odolnost proti teplotním šokům a vyšší tepelnou vodivost. Používá se převážně pro HSC a HFC obrábění vysocelegovaných niklových slitin. Používají se také na obrábění litin, ale nejsou vhodné pro obrábění ocelí. [12]
- Směsná keramika – Jedná se o směs oxidu hlinitého  $Al_2O_3$  a karbidu titanu  $TiC$  v množství 20–40 %. Má vyšší odolnost proti mechanickým a teplotním rázům v porovnání s čistou keramikou. Používá se k frézování šedé litiny a ocelí, soustružení cementované či zušlechťené oceli, nebo také pro soustružení tvrdé litiny. [9]

### 2.1.3 Cermety

Cermety jsou keramicko-kovové kompozity. Skládají se tedy ze dvou fází, a to fáze kovové a keramické. Z těchto složek je také odvozen jejich název – **cer**amic a **met**al. Dalšími prvky, ze kterých se cermety skládají jsou karbidy, nitridy či karbonitridy titanu, molybdenu, wolframu, tantalu, niobu, vanadu nebo i hliníku. Hlavní složkou je zde TiN. Výhodou těchto materiálů oproti běžným slinutým karbidům je menší velikost zrna, vyšší odolnost proti opotřebení a termodynamická stabilita. Dalo by se tedy říct, že cermety jsou kompromisem křehkých, ale tvrdých řezných keramik a tvrdými, avšak snadno opotřebitelnými slinutými karbidy. [13]

Stejně jako slinuté karbidy jsou vyráběny metodou práškového slinování. Mikrostruktura vykazuje tvrdé otěruvzdorné částice na povrchu, které přecházejí do houževnatého jádra odolného proti šíření trhlin. Moderní cermety jsou také vícevrstvě povlakovány pro další zlepšení jejich vlastností. [13]

Použití nacházejí v obrábění ocelí, litin, lité ocele, neželezných kovů a některých slitin. Především k dokončovacím operacím s řeznou rychlostí do cca  $360 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a posuvu na otáčku 0,3 mm. Pro hrubování nejsou příliš vhodné z důvodu jejich křehkosti a malé houževnatosti. [14]

### 2.1.4 Supertvrde řezné materiály

Mezi tyto materiály řadíme převážně polykrystalický diamant a kubický nitrid bóru:

**Diamantové** řezné nástroje se používají ve třech variantách. Buď jako krystalické přírodní diamanty ve tvaru břitu upevněné do držáku nástroje vyvrtávací tyče, jako synteticky vyrobený polykrystalický diamant, který byl slinován pod vysokým tlakem do výsledného tvaru nebo jako CVD povlak na jiných materiálech. Diamantové materiály jsou velmi odolné proti abrazivnímu opotřebení. [15]

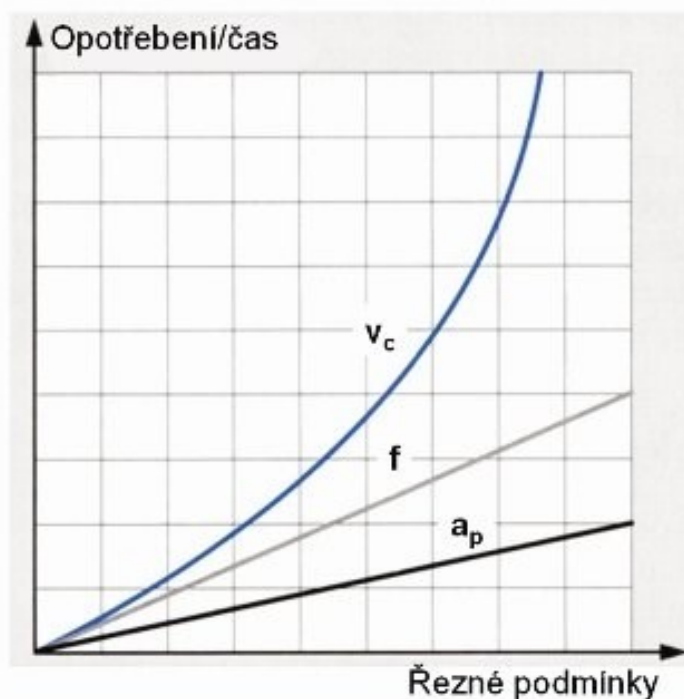
Používají se pro obrábění sklolaminátu, různých druhů plastů, teflonu, nylonu, neželezných kovů jako jsou slitiny hliníku a křemíku, mědi mosazi, zinku, bronzu atd. Nejsou však vhodné pro obrábění litin a ocelí, protože se diamant při vyšších teplotách mění na grafit. [15]

**Kubický nitrid bóru** je společně s diamantem nejtvrdším známým materiálem. Oproti diamantovým nástrojům si udrží svou tvrdost i při vyšších teplotách a má nižší tepelnou

vodivost. Na vzduchu je velmi stabilní. Používá se tedy pro hrubovací i dokončovací obrábění velmi tvrdých, žárupevných a houževnatých materiálů jako jsou kalené uhlíkové a legované oceli, kalené nástrojové oceli, tvrdé litiny a superslitiny niklu a kobaltu. [9] [15]

## 2.2 Volba řezných podmínek

Mezi základní řezné podmínky patří řezná rychlost  $v_c$ , hloubka řezu  $a_p$  a rychlost posuvu  $v_f$ . Pro správnou volbu řezných podmínek je nutné vyhodnotit všechny důležité faktory jako je druh frézovaného materiálu, materiál řezného nástroje a jeho fyzikální pevnost a požadavek na kvalitu výsledného obrobeného povrchu. [16] Žádoucí je nastavit takové řezné podmínky, aby byl proces obrábění kontrolovatelný, předvídatelný a bezpečný. To znamená, že vzniká pouze opotřebení ve formě otěru hřbetu nebo výmolů na čele. [17]



Obr. 7 - závislost opotřebení na řezných podmínkách [17]

Pro správné formování třísky je nutné nastavit hloubky řezu tak, aby bylo větší než radius břitové destičky. Zároveň nesmí být příliš velká, protože to způsobuje vylomení břitu. Posuv se musí nastavit maximálně do velikosti poloviny břitové destičky. Při větším posuvu hrozí také vylomení břitu. Řezná rychlost musí být dostatečně vysoká, jinak dochází k růstu nárůstků na hraně nástroje. Avšak při příliš vysoké řezné rychlosti dochází ke vzniku velkých teplot v místě řezu a tím k chemickému opotřebení nástroje. [17]

Nejmenší vliv na trvanlivost nástroje má hloubka řezu  $a_p$ . Pokud dojde k jejímu zvýšení o 10 %, trvanlivost nástroje se sníží pouze o 5 %, za předpokladu, že nezačne docházet k vylamování břitu. Když zvýšíme posuv, je vliv na trvanlivost vyšší. Při zvýšení posuvu o 10 % dojde ke snížení trvanlivosti nástroje o 20 %. Nejvyšší vliv na trvanlivost břitu má řezná rychlost  $v_c$ , které je hlavním činitelem jeho životnosti. Pokud  $v_c$  zvýšíme o 10 %, dojde k zásadnímu snížení trvanlivosti o 50 %. [17]

U frézování tvrdých kalených ocelí o tvrdosti 45–65 HRC je hlavním problémem abrazivní opotřebení břitové části destiček. Je proto vhodné používat VBD s ostrými břity a s pozitivní geometrií, což nám sníží velikost řezných sil. Také je žádoucí obrábět za sucha = bez řezné kapaliny. Důležitá je také správná volba strategie obrábění, kdy je při čelním obrábění výhodné použít malou řeznou rychlost  $v_c$ , ale zato velkou hloubku řezu  $a_p$  a pracovním záběrem  $a_e$ . [18]

## **2.3 Technologie vhodné pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů**

Existuje velké množství technologií, které jsou vhodné pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů, jako je vysokorychlostní obrábění, suché obrábění, tvrdé obrábění, abrazivní metody (broušení) až po elektroerozivní nekonvenční metody obrábění.

Především vysoce výkonné metody obrábění jsou vyžadovány současným vývojem strojírenství, kdy je kladen neustálý tlak na výrobní náklady, ceny a ekologická hlediska výroby. Za ekologicky nevyhovující v dnešní době můžeme označit procesní kapaliny. Ty sice výrazně zlepšují průběh obrábění, ale jsou vyráběny na bázi ropy s přísadou chlóru, fosforu nebo síry. To výrazně komplikuje jejich ekologickou likvidaci. Na základě těchto problémů dochází k rozvoji moderních technologií obrábění HSC (High Speed Cutting), HFC (High Feed Cutting) a HPC (High Performance Cutting). [19]

### **2.3.1 Abrazivní technologie obrábění**

Jedná se o obrábění brusivem, které působením tlaku, pohybu a rychlosti opotřebovávají jiný materiál. Materiál, ze kterého je vyráběné brusivo se vyznačuje vysokou tvrdostí a střední až vysokou lomovou houževnatostí. Brusná zrna jsou vyráběna přírodně nebo ze syntetických materiálů, které jsou z hlediska chemického složení a vlastností čistější. [16] Syntetické materiály se tedy dělí na:

- oxid hlinitý  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – Neboli umělý korund je obchodně nejdůležitější abrazivní, velmi tvrdý materiál na bázi hliníku. Bílý oxid hlinitý, který má čistotu 99 % se používá v lékařství a zubařství. Kalcinovaný oxid hlinitý vyráběný při vysokých teplotách se používá pro leštění a lapování,
- oxid hlinitý s chromem a titanem – Jedná se o směsné brusivo, které se používá pro broušení ocelí, železných kovů a pevnostních slitin,
- karbid křemíku  $\text{SiC}$  – Je tvrdší než umělý korund. Používá se jak pro broušení tvrdých materiálů typu karbidu wolframu, tak díky jeho ostrým zrnům pro broušení měkkých materiálů jako hliník, měď a její slitiny, mosaz, nerezová ocel či plastů,
- kubický nitrid bóru – V porovnání s ostatními brusivy je drahý, avšak vysoce odolný materiál. Používá se k broušení tvrdých materiálů, jako je nástrojová ocel nebo letecké slitiny,
- syntetický diamant – Brusné kotouče z tohoto materiálu se používají k broušení keramiky, skla nebo slinutých karbidů. [16]

### 2.3.2 HSC – vysokorychlostní obrábění

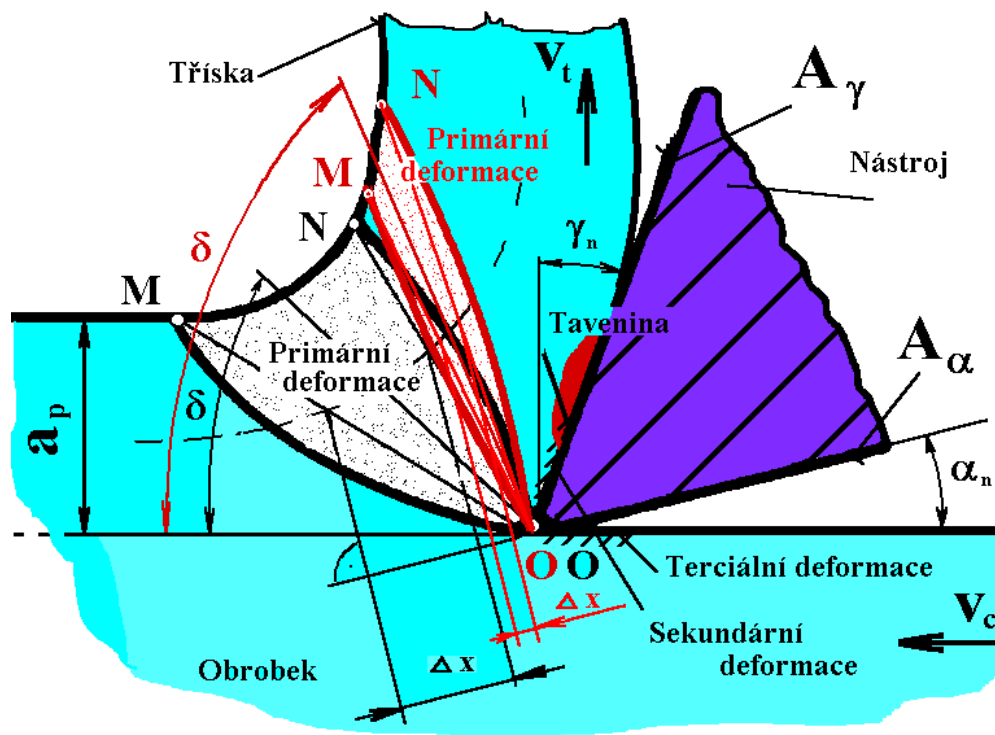
Tyto metody obrábění jsou vyžadovány současným vývojem strojírenství, kdy je kladen neustálý tlak na výrobní náklady, ceny a ekologická hlediska výroby. Za ekologicky nevyhovující v dnešní době můžeme označit procesní kapaliny. Ty sice výrazně zlepšují průběh obrábění, ale jsou vyráběny na bázi ropy s přísadou chlóru, fosforu nebo síry. To výrazně komplikuje jejich ekologickou likvidaci. Na základě těchto problémů dochází k rozvoji moderních technologií obrábění HSC (High Speed Cutting), HFC (High Feed Cutting) a HPC (High Performance Cutting). [19]

Podstatný rozdíl mezi klasickým a HSC obráběním spočívá v mechanismu tvorby třísky. Tvorba třísky je velice složitý proces, který závisí na fyzikálních vlastnostech materiálu, nástroje, geometrii nástroje a řezných podmínkách. [20]

Při klasickém obrábění dochází k tvrdnutí třísky, které je způsobeno mechanickým zpevněním ve smykové rovině. Mezi třískou a čelem nástroje působí přítlačné a třecí síly, které vyvolávají velké teplo, zahřívají nástroj a podporují difuzní procesy, které jej poškozuji například ve formě vznikajících kráterů na čele. [20]

Oproti tomu při HSC za použití tvrdých a tepelně odolných nástrojů a správně zvolených řezných podmínek, jako je velikost posuvu  $v_f$  větší než  $15 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  (ideálně však vyšší než

30 m.min<sup>-1</sup>) dochází ke změně metalurgických, mechanických a chemických procesů. Třísky působí menší přitlačnou silou na čelo nástroje, změkne a klesá celkový řezný odpor, zvětší se úhel smykové roviny a tříska odchází mnohem rychleji z kontaktní zóny. Tím se sníží množství tepla přenášené na nástroj a většina (asi 95 %) odchází společně s třískou což má zásadní vliv na životnost nástroje a kvalitu obráběné plochy. [20]



Obr. 8 - tvorba třísky u HSC technologie [20]

#### Výhody HSC:

- obrábí se „za sucha“ – nepoužívají se žádná mazací a chladicí kapaliny,
- vyšší přesnost a kvalita obrobeneho povrchu,
- nižší tepelné a mechanické zatěžování nástroje z důvodu odchodu tepla třískou,
- posuv je vyšší než šíření tepla materiálem,
- vyšší životnost nástrojů,
- nižší vibrace,
- pokles řezných sil díky vysoké řezné rychlosti,
- pokles radiálních sil způsobený malou hloubkou záběru třísky.

#### Nevýhody HSC:

- vysoká zrychlení a zpomalování negativně působí na životnost ložisek vřetene, kuličkových šroubů, vodítek atd.,



- velké nároky na parametry strojů a nástrojů,
- potřeba kvalifikovaných a vzdělaných zaměstnanců znalých procesů HSC,
- lidské nebo softwarové chyby mají vážnější následky,
- stroje musí být opatřeny vysoce bezpečnostními skly a kryty. [20]

*Tabulka 2 - Řezné rychlosti dosahované při HSC obrábění [19]*

Obráběný materiál	$V_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	Materiál nástroje
Ocel	800–1100	Povlakované SK, ŘK,
Slitiny Ti	150–1000	Povlakované SK
Slitiny Ni	160–280	Povlakované SK, ŘK,
Šedá litina	900–1600	ŘK
Slitiny Al	3000–6000	Polykrystalický diamant
Plasty zpevněné vlákny	2800–8000	Povlakované cermety
Bronz, Mosaz	1100–3000	Povlakované SK, PKD

*Tabulka 3 - Teploty dosahované při HSC obrábění [19]*

Materiál obrobku	Teplota při obrábění [°C]
Hliník	600
Bronz	1000
Šedá litina	1300
Ocel	1500

#### **Požadavky kladené na stroje pro HSC:**

- Jelikož se při HSC dosahuje vysokých řezných rychlostí, velikosti posuvu a tím pádem velkého posuvu na zub, musí být vřeteno stroje dostatečně tuhé, mít plynule říditelný kroutící moment a dosahovat vysokých otáček,
- upínání stroje musí být schopno poskytnout přesné upnutí s minimálním obvodovým házením. Vhodné je používat upínání do smršťovacího sklíčidla nebo sklíčidla s hydraulickým upínáním,
- pohony os stroje musí zajišťovat vysoké posuvové rychlosti, zrychlení/zpomalení a přesný posun po naprogramované trajektorii,
- tlumení vibrací, hluku a zajištění maximální bezpečnosti, protože při kolizi nebo projevení skryté vady nástroje a jeho následnému zničení mohou úlomky nebezpečně vystřelovat velkou rychlostí. [20]

### Požadavky kladené a nástroje pro HSC:

- Použití vhodného materiálu nástroje – zejména povlakované slinuté karbidy, cermety, řezné keramiky či kubický nitrid boru,
- odolnost proti vysokým teplotám, protože třísky dosahují teploty tavení obráběného materiálu,
- vysoká tvrdost, houževnatost a odolnost proti chemickému opotřebení,
- vysoká pevnost v tlaku a ohybu [20]

### 2.3.3 HFC a HPC obrábění

**HFC – vysokoposuvové obrábění** – Tato metoda, jak již název napovídá spočívá v obrábění vysokými posuvovými rychlostmi. Jedná se produktivní metodu třískového obrábění, ale je při ní nutné používat speciální nástroje a strategie obrábění. Oproti HSC zde musíme brát zřetel i na maximální posuvovou rychlost a tloušťku třísky. Jako nástroje se používají robustnější VBD ze slinutých karbidů s malým úhlem nastavení hlavního ostří. Používaný úběr materiálu  $a_p$  je do 2 mm a posuv na zub  $f_z$  se pohybuje v rozmezí 2,5–3 mm. Při této technologii se mění směr řezných sil. Zmenšuje se radiální síla, což má za následek možnost používání delších nástrojů až do 7xD a využití při obrábění tenkostěnných, štíhlých součástí. [19]

**HPC – vysokovýkonné obrábění** – Tato metoda se vyznačuje velkým úběrem třísky  $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . Toho se docílí především velkou hloubkou řezu při frézování, která je zhruba 1,5xD a volbou technologie obrábění tzv. trochoidním obráběním, kdy se fréza pohybuje po trochoidě, která je určena rotačním a translačním pohybem, což přerušuje řez a minimalizuje vznik vibrací. HPC obrábění klade vysoké nároky na soustavu stroj – nástroj – obrobek. Používanými nástroji u této metody jsou hlavy VBD vyrobené ze slinutých karbidů povlakovanými vrstvy (Ti,Al)N, (Al,Ti)N nebo nanokompozitní (Al,Cr,Si)N, které mají vysokou tepelnou odolnost. Používají se též stopkové frézy, vrtáky nebo vyvrtávací tyče. Typické využití má tato metoda v oblasti 2,5D frézování, především tam, kde požadováno velké množství úběru materiálu. Jde především o hrubovací operace, ale je možno obrábět i oceli o tvrdosti 67 HRC. [19]

### 2.3.4 Suché a kvazisuché obrábění

Jedná se o obrábění, při kterém je snaha eliminovat či úplně vyloučit používání procesních kapalin. Motivací pro tento přístup je moderní snaha šetřit životní prostředí, ale především nákladová stránka věci, kdy je cílem co nejvíce snížit výdaje na nákup, skladování, filtraci a likvidaci těchto kapalin. [21] Dle statických údajů tyto náklady tvoří 7–17 % ceny výrobku. [9]

Kromě plně suchého obrábění existuje i kvazisuché obrábění, kdy nejsou řezné kapaliny zcela vyloučené, ale používají se v omezeném, co nejmenším množství. Zde řezné kapaliny neslouží k odplavování třísek a chlazení nástroje, ale především k mazání. [21]

Problémem u suchého a kvazisuchého obrábění je odvod třísek z místa řezu nebo částí stroje. Je nutné zamezit hromadění horkých třísek na obrobených plochách, prohlubních obrobku nebo na rámu stroje. Na to se musí myslet při konstrukci stroje a vhodně umístit rámy stroje, případně stroj vybavit ofukem. [21]

Suché obrábění nachází uplatnění především při obrábění tvrdých kalených ocelí, konkrétně například forem pro zápusťkové kování. Výhodou takového obrábění je zamezení vzniku teplotních šoků a praskání povlaků. Nelze jej však použít při všech metodách třískového obrábění. Nelze používat u řezání hlubších děr nebo závitování, kde je přísun řezných kapalin naprosto klíčový. [21]

### 2.3.5 Tvrdé obrábění

Tato technologie obrábění je hnána snahou nahradit dokončovací broušení metodou obrábění s definovanou geometrií břitu. To je umožněno pomocí nástrojů vyrobených na bázi polykrystalického kubického nitridu bóru (PCBN). Ten je po diamantu druhým nejtvrdším materiálem a má vysokou odolnost proti teplotním šokům. [21]

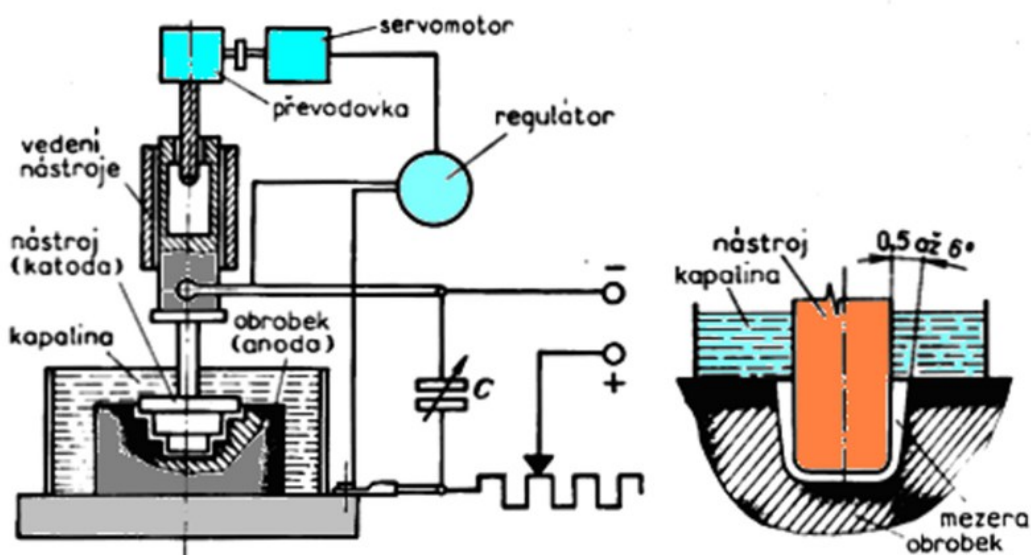
Předností tvrdého obrábění je vzhledem k broušení, které nahrazuje vyšší úběr materiálu, menší tepelné ovlivnění obráběného povrchu, protože rozvoj tepla je omezený na hrot nástroje, lepší flexibilita a použitelnost při obrábění tvarových ploch nebo omezení řezných kapalin. Mezi nevýhody je nutné zařadit závislost výsledné drsnosti na řezných podmínkách  $v_c$  a  $f_n$  a nebezpečí vzniku lomu břitu z důvodu velkého měrného zatížení. [21]

V praxi je metoda aplikovaná pro obrábění tvrdých ocelí o tvrdosti 55–64 HRC při použití řezné rychlosti v rozsahu 110–125 m.min<sup>-1</sup>. Vzhledem k povaze metody není možné obrábět obrobky s nízkou tuhostí nebo ve vysoké přesnosti. [21]

### 2.3.6 NMO – Elektroerozivní obrábění (EDM)

Jedná se o nekonvenční metodu obrábění, kde je základním požadavkem elektrická vodivost obráběného materiálu. Je to z důvodu, že principem metody je uměle vyvolaný elektrický výboj mezi anodou, která představuje nástroj a katodou – tedy obrobkem. Tímto vzniklým výbojem dochází k úběru materiálu. Tento řezný proces úběru probíhá v dielektrické lázni, což je kapalina s vysokým elektrickým odporem. Přivedením elektrického napětí na anodu a jejím přiblížením k obrobku (katodě) vznikne elektrický oblouk, který začne natavovat částice materiálu. Ty jsou po odtavení odplavovány dielektrikem.

Metody EDM obrábění lze použít k výrobě ploch a řezů tvrdých materiálů. Dosahuje se i vysoké rozměrové přesnosti v rozsahu 0,001 μm a povrchové drsnosti až Ra 0,2 μm. V rámci rozsahu použitelnosti v mé diplomové práci stojí za zmínku **elektrojiskrové hloubení**. Jedná se o stěžejní metodu EDM, při které jsou používány elektrody vyrobené z grafitu, mědi a sloučenin mědi a wolframu, stříbra + wolframu, mosazi a dalších materiálů. Využitelnost je při výrobě licích forem, kovacích zápustek atd.



Obr. 9 - Princip elektroerozivního hloubení [22]

### 3 Návrh experimentální části

Firma UNEX a.s. patří mezi tradiční české firmy Specializuje se na těžké strojírenství a metalurgii. Společnost vlastní tři pobočky a disponuje značnými výrobními kapacitami v široké škále oborů. Její roční obrat je okolo 3 mld. Kč. Tato práce je zaměřena na pobočku UNEX a.s. – závod Olomouc. Jedná se o bývalou úspěšnou firmu Moravské železářny a.s., která je neoddělitelně spjata s historií olomouckého průmyslu. V dobách největší slávy zaměstnávala tisíce lidí a patřila k monopolním výrobcům fitinek v celém Československu. V roce 2005 došlo k akvizici 100 % akcií společností UNEX a.s. [23]

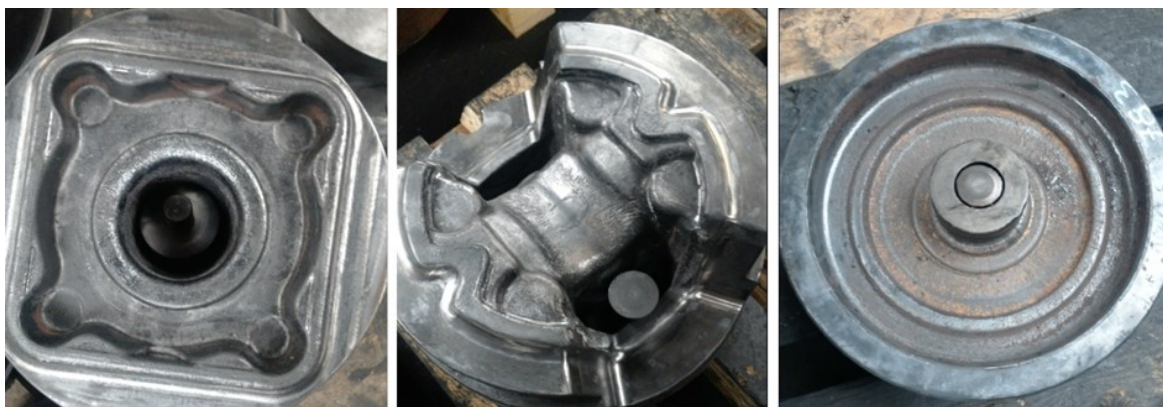
Na Olomoucké kovárně a obrobně naší firmy vyrábíme široký sortiment výkovků a obrobků. Od rotačních výkovků až po složité výkovky různých tvarů a velikostí až do hmotnosti 25 kg. Většinu zápusťkových zařízení si vyrábíme na naší obrobně. Ve firmě jsou výrobky následně vykovány a obrobeny do finální podoby dle požadavků zákazníků. [23]

Cílem této práce je zvolit a otestovat nové nástroje obrábění kalených zápusťvek a jejich návarů, protože ve firmě UNEX a.s. jsme změnili elektrody tvrdonávaru pro obnovu opotřeбенých zápusťvek a současné nástroje se jeví jako neefektivní. V této části tedy nejprve rozeberu postup výroby a obnovy zápusťvek a poté samotné obrábění a volbu nových nástrojů.

#### 3.1 Výroba nových zápusťkových zařízení

##### **Obecný postup výroby nových zápusťvek:**

- na základě dodaného výkresu výkovku konstruktér navrhne všechny části zápusťkového zařízení (spodní a horní zápusťka, vyhazovače, trny, vložky atd.),
- na základě výkresové dokumentace technolog určí a objedná materiál potřebný k výrobě. pro zápusťky se používá niklová nástrojová ocel 56NiCrMoV7. Pro ostatní části jako trny, vložky či vyhazovače se používá chrom-molybdenová ocel X38CrMoV51, kterou lze kalit na vyšší tvrdost než ocel používanou pro zápusťky,
- technolog určí stroje, technologické postupy, normové časy atd. potřebné k výrobě zápusťkových zařízení,
- podle dostupných výrobních kapacit je provedeno zaplánování do výroby,
- samotná výroba zápusťvek. [23]



*Obr. 10 - ukázka zápustek firmy UNEX a.s.*

### 1) Hrubování tvaru zápustek

Jako první krok technolog objedná potřebný materiál na základě dodané výkresové dokumentace. Během kování jsou zápustky namáhány vysokým tepelným cyklem, a proto jsou kladeny vysoké nároky na jejich mechanické vlastnosti. Materiál musí mít vysokou tvrdost, houževnatost, pevnost, odolnost proti únavě, opotřebení a plastické deformaci.

Nejvhodnější pro tuto aplikaci je nástrojová ocel značená dle EN ISO 4957 - 55NiCrMoV7. Díky nižšímu obsahu uhlíku a docela vysokému obsahu niklu, má vyšší houževnatost a tím pádem vyšší odolnost proti rázům než vysocelegované typy ocelí. Proto je tato ocel vhodná pro aplikace, kde je potřeba vyšší houževnatosti, jako jsou razníky, protlačovací a tvářecí nástroje nebo nástroje pro stříhání a ohýbání. [24]

*Tabulka 4 - Chemické složení nástrojové oceli 55NiCrMoV7*

C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	V [%]
0,50–0,60	0,10–0,40	0,60–0,90	0,80–1,20	0,35–0,55	1,50–1,80	0,05–0,15

Poté se dle typu zápustky zvolí obráběcí stroj. Rotační zápustky jsou celé vyrobeny na univerzálním hrotovém soustruhu TOS SU 63 A. U tvarových zápustek se stočí průměr a čela na požadované rozměry, funkční tvar pro kování se poté obrobí na CNC řízeném frézovacím centru DMC 64 V Linear nebo DMF 250 Linear. (viz. tabulka č. 5 a 6)

Trny, vložky a nože jsou vyrobeny stejným postupem, jako samotné zápustky, ale z nástrojové oceli X38CrMoV51. Tvar a tolerované rozměry všech druhů zápustek (rotačních i tvarových) komponent jsou obrobeny s přídavky 0,2 až 0,3 mm pro kalení. Parametry používaných CNC řízených frézovacích centrů jsou následující:

*Tabulka 5 - Parametry stroje DMC 64 V Linear a DMF 250 Linear [26][27]*

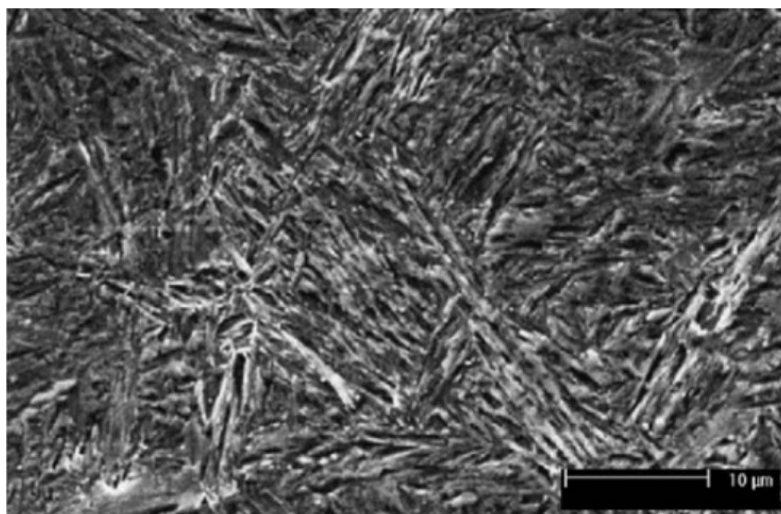
Parametr	DMC 64 V Linear	DMF 250 Linear
Výrobce	Deckel Maho	Deckel Maho
Řídicí systém	Heidenhain iTNC 530	Heidenhain iTNC 530
Posuv v ose X	640 mm	2 500 mm
Posuv v ose Y	600 mm	920 mm
Posuv v ose Z	500 mm	820 mm
Max. otáčky	12 000 min <sup>-1</sup>	12 000 min <sup>-1</sup>
Upínací kužel	SK 40	SK 40
Zásobník nástrojů	30 ks	30 ks
rozměr stolu	850x600 mm	3100x900
max. hmotnost obrobku	600 kg	3000 kg



*Obr. 11 – stroj DMC 64 V Linear [26]*

## 2) Tepelné zpracování

Následně jsou zápustky a jejich komponenty převezeny do externí kalírny. Zápustky jsou vakuově kaleny a 2x popouštěny na 44+2 HRC, případně na 51+2 HRC dle typu zápustky. Trny a vložky na 54+2 HRC. tímto tepelným zpracováním vzniká struktura obsahující martenzitické lamely a malé množství primárních karbidů. To zapříčiňuje požadované zlepšení tvrdosti a odolnosti proti opotřebení materiálu, což zhoršuje obrobiteľnost a klade vyšší nároky na řezné nástroje.



*Obr. 12 – mikrostruktura zakalené oceli 55NiCrMoV7 [24]*

## 3) dokončovací obrábění

Po kalení následuje obrobení přídavků pro kalení na požadované rozměry. Rotační komponenty na soustruhu, tvarové na CNC frézovacím centru stejně jako u hrubování zápustek před kalením.

Po vyjmutí zápustek z obráběcích strojů, se v místech s nedostatečnou jakostí povrchu na funkčních plochách povrch ručně obrousí na drsnost  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ . Dále jsou na stojanové vrtačce vyvrtány manipulační otvory, potřebné k manipulaci se zápustkou při ustavování v kovacím lise. Pokud nebylo značení vygravírováno na frézovacím centru, je doděláno buďto ručně zámečnickem nebo na elektroerozivní hloubičce.

Jako poslední se provede měření a kontrola zápustkového zařízení. Ta se provádí pomocí ručních měřidel, případně u složitých tvarů na 3D souřadnicovém měřicím stroji od firmy Zeiss.



### 3.2 Obnova poškozených zápustek

Každé zápustkové zařízení má omezenou životnost. Vlivem velkých kovacíh sil a teplot dochází k jejich opotřebení. Jedná se o povrchová poškození, praskliny a v krajních případech dochází až k úplnému rozlomení zápustek nebo jejich částí. Tomuto poškození se však snaží zamezit důslednou kontrolou zápustek před začátkem kování, protože má za následek poškození kovacíh lisů nebo v krajním případě i zdraví pracovníků.

Životnost zápustek je zvyšována například použitím trnů či vložek, které jsou umístěny v místě vysokého namáhání. Jejich výhoda spočívá v tom, že v těchto místech dochází k velkému mechanickému namáhání funkčních ploch a proto je vhodná vyšší tvrdost (trny a vložky jsou kaleny o 10 HRC více než samotné zápustky) a při velkém poškození nebo dokonce zničení (rozlomení) stačí vyměnit pouze tuto část tvořenou trnem/vložkou a není třeba vyrábět celou novou zápustku, což je ekonomicky i časově výhodné.



*Obr. 13 – Ukázka poškozených zápustek firmy UNEX a.s.*

Mimo používání a výměny vložek/trnů je nejčastějším způsobem, jak ušetřit značnou část nákladů na pořízení zápustkových zařízení obnova pouze opotřebovaných částí zápustek, namísto výroby nových. Nejvíce opotřebované jsou zápustky pro 2. operaci, protože u ní dochází k největšímu tečením materiálu. Tuto metodu oprav více popíšu níže:

#### **Obecný postup při obnově zápustkových zařízení:**

- Vizuální kontrola technologem, který určí, zda je potřeba vyrobit novou zápustku nebo je možné provést její obnovu. Přesně specifikuje, jaký druh obnovy bude proveden,
- Technolog stanoví normové časy, postup opravy atd.
- zaplánování do výroby,
- Provedení opravy zápustky

## 1) Hrubování opotřebení

Jako první se provede hrubování opotřebeného tvaru zápustky a jejích částí. U rotačních tvarů se hrubování provede na soustruhu, u tvarových zápustek se použije CNC frézovací centrum, stejně jako při výrobě nových zápustek popsané v kapitole 3.1 *výroba nových zápustkových zařízení*. Míra hrubování se provede dle opotřebení, nejméně však do hloubky 3 mm. Na začátku obnovy je důležité přesně určit její druh. Provádí se 4 hlavní způsoby obnovy:

- Pokud je zápustka konstruována s přídavky ke snížení, provede se snížení jejího tvaru = celý tvar a výška zápustky se sníží o 5 mm dle tabulky snížení. Musí se také provést snížení příslušných trnů/vložek a vyhazovačů. Není zde tedy žádná tepelné zpracování ani dovařování.
- Obnova celého tvaru zápustky.
- Obnova pouze dna zápustky.
- Obnova pouze dělicí roviny.

## 2) Dovaření vyhrubované části

Po vyhrubování tvaru je zápustka a její části převezena na svařovnu, kde jsou vyhrubovaná místa dovařena k následnému obrobení na požadovaný tvar dle výkresu. Před samotným dovařováním je proveden ohřev zápustek v peci na 250-300 °C a sušení elektrod kvůli zamezení vzniku trhlin.

Návar je provedeno bazickou elektrodou OK Weartrade 40 (E-B 503) od firmy ESAB o průměru 4 nebo 5 mm, podle typu a velikosti zápustky. Jedná se o elektrodu určenou pro navařování nástrojů pracujících za tepla (nad 400 °C). Především tedy kovací a lisovací nástroje. Tvrdost návaru je shodná se základním materiálem, na který je dovařován = cca 45 HRC u 3. vrstvy návaru. Ostatní mechanické vlastnosti jako odolnost proti abrazi nebo rázům jsou taktéž srovnatelné se základním materiálem. Tento návar tedy nesnižuje, ale ani nezvyšuje celkovou životnost oproti novým zápustkám. [28]

Tabulka 6 - Chemické složení elektrody OK Weartrade 40 [28]

C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]
0,2	0,40	0,90	2,0	0,5	0,5

Dovařené jsou části dle popisu výše. Buď celý tvar zápustky nebo jen její dno či dělicí rovina. Vložky/trny a vyhazovače jsou podvařené a snížené obráběním z čela.



*Obr. 14 – Ukázka dovařených zápustek firmy UNEX a.s.*

### 3) Dokončovací obrábění návaru

Dle typu zápustky je po dovaření osoustružena nebo ofrézována na požadovaný tvar dle výkresu. Ve většině případů je ještě nutné vygravírovat značení dle požadavků zákazníku. To je provedeno buď ručně nebo na obráběcím frézovacím centru. Volba strojů je zde stejná jako u předchozího dokončovacího obrábění popsaného v kapitole 3.1 výroba nových zápustkových zařízení, stejně tak finální broušení povrchu a kontrola. Používané jsou nástroje ze slinutých karbidů.

### 3.3 Návrh nové technologie opravy zápustek a experimentu

Pro zvýšení životnosti zápustek naší kovárny došlo k racionalizaci jejich obnovy po opotřebení. Došlo k vytipování vhodných zápustek, kde jsme změnili používaný návar ESAB OK Weartrode 40 na speciální tvrdonávar Capilla 66. Výsledkem tohoto tvrdonávaru je několikanásobné zvýšení životnosti zápustek.

Capilla 66 je rutil-bazická elektroda, která je určena k opravě tepelně namáhaných tvářecích nástrojů (zápustek). Po navaření dosahuje tvrdosti 50–55 HRC, v žíhaném stavu okolo 53–56 HRC. Kromě zmíněné tvrdosti tyto návary vynikají výbornou odolností proti abrazivnímu opotřebení, rázům a tlaku. Výťažnost elektrod je 140 %. [29]

*Tabulka 7 - Chemické složení elektrody Capilla 66 [29]*

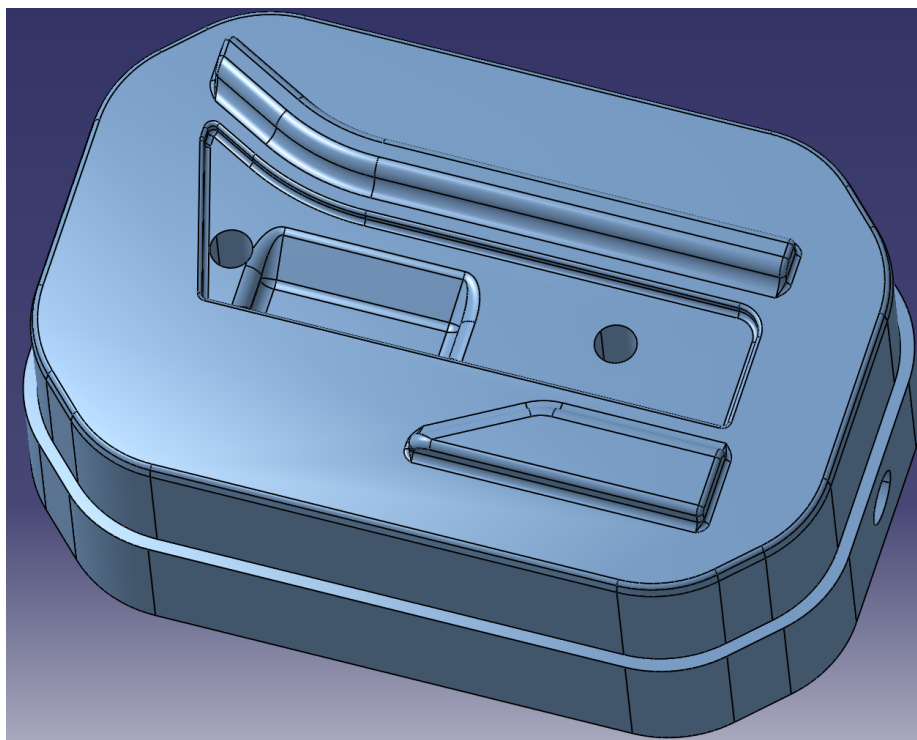
C [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	W [%]	V [%]
max. 0,4	6,0–8,0	0,4–0,7	1,0–1,5	6,0–8,0	0,5–0,8

Kromě excelentních mechanických vlastností, které zvyšují životnost zápustek má tento tvrdonávar i svá negativa. Dendritická mikrostruktura tohoto návaru patrná z obr. 15 zhoršuje obrobiteľnosť, čož vyžaduje vyšší nároky na stroj a nástroje při jeho frézování.



*Obr. 15 – Dendritická mikrostruktura tvrdonávaru [24]*

Pro tuto diplomovou práci jsem zvolil zápustku s podnikovým číslem firmy UNEX a.s. MZ5412040. Konkrétně spodní díl zápustky 2. operace. Výkres sestavy tohoto zápustkového zařízení 2. operace lze vidět v příloze A a výkres pouze spodní části zápustky v příloze B.



*Obr. 16 – model spodní zápustky 2. operace z programu Catia V5*

### 3.3.1 Původní technologie opravy zápustky

Původní oprava spodní zápustky 2. operace podnikového artiklu MZ5412040 byla snížením o 5 mm v souladu s postupem popsáném v předchozí kapitole 3.4 Obnova poškozených zápustek. Obnova dovařením klasickým návarem zde byla neekonomická, proto se oprava prováděla obnova snížením. Pro úplnost zde doplňuji postup frézování:

Tabulka 8 – PP frézování pro opravu snížením o 5 mm

<b>Č.op: 1</b>	<b>Pracoviště: 2637</b>	<b>Stroj: DMC 64</b>	<b>Technologie: obrábění</b>				
<b>Název: spodek 2. operace</b>		<b>Č.v.:109716</b>	<b>Materiál: tvrdonávar</b>				
<b>Datum: 15.4.2019</b>		<b>Index:</b>	<b>Vypracoval: Ledvina</b>				
<b>Č. úseku</b>	<b>Popis operace</b>	<b>Strana: 1/1</b>	<b>Řezné podmínky</b>				
	<b>nástroj</b>	<b><math>v_c</math> [m.min<sup>-1</sup>]</b>	<b><math>f_z</math> [mm]</b>	<b><math>a_e</math> [%]</b>	<b><math>a_p</math> [mm]</b>	<b><math>z_{eff}</math></b>	<b><math>T_{As}</math> [hod]</b>
<b>05</b>	Snížit zápustku z čela + nahrubo tvar o 5 mm.						
	Fr. Korloy Ø 40	120	0,78	70	0,4	4	0,65
<b>10</b>	Snížit zbytek tvaru o 5 mm.						
	Fr. Pramet Ø 16	119	0,27	50	0,2	2	0,25
<b>15</b>	Dokončovací frézování rádiusů vnějšího tvaru						
	Kul. fr. TGS Ø 8	120	0,09	20	0,28	2	0,18
<b>20</b>	Hrubování tvaru kapsy a funkčních ploch						
	Fr. Innotool Ø 24	100	0,3	34	0,2	2	0,12
<b>25</b>	Dokončování vnějších rádiusů a funkčních ploch						
	Kul. fr. YG Ø 16	160	0,23	2,5	0,4	2	1,35
<b>30</b>	Dokončování vnitřních rádiusů a funkčních ploch						
	Kul. fr. YG Ø 12	160	0,13	2	0,24	2	0,67
<b>35</b>	Dokončování vnitřních rádiusů a funkčních ploch						
	Kul. fr. TGS Ø 8	150	0,09	2	0,16	2	1,06
<b>40</b>	Dokončování vnitřních rádiusů a funkčních ploch						
	Kul. fr. TGS Ø 6	150	0,07	2	0,12	2	0,5
<b>45</b>	Dokončování vnitřních rádiusů a funkčních ploch						
	Kul. fr. TGS Ø 4	120	0,06	2	0,08	2	0,3
<b>50</b>	Snížení obvodového osazení o 5 mm						
	Válcová fr. Ø 25	54	0,04	1	5	6	0,15

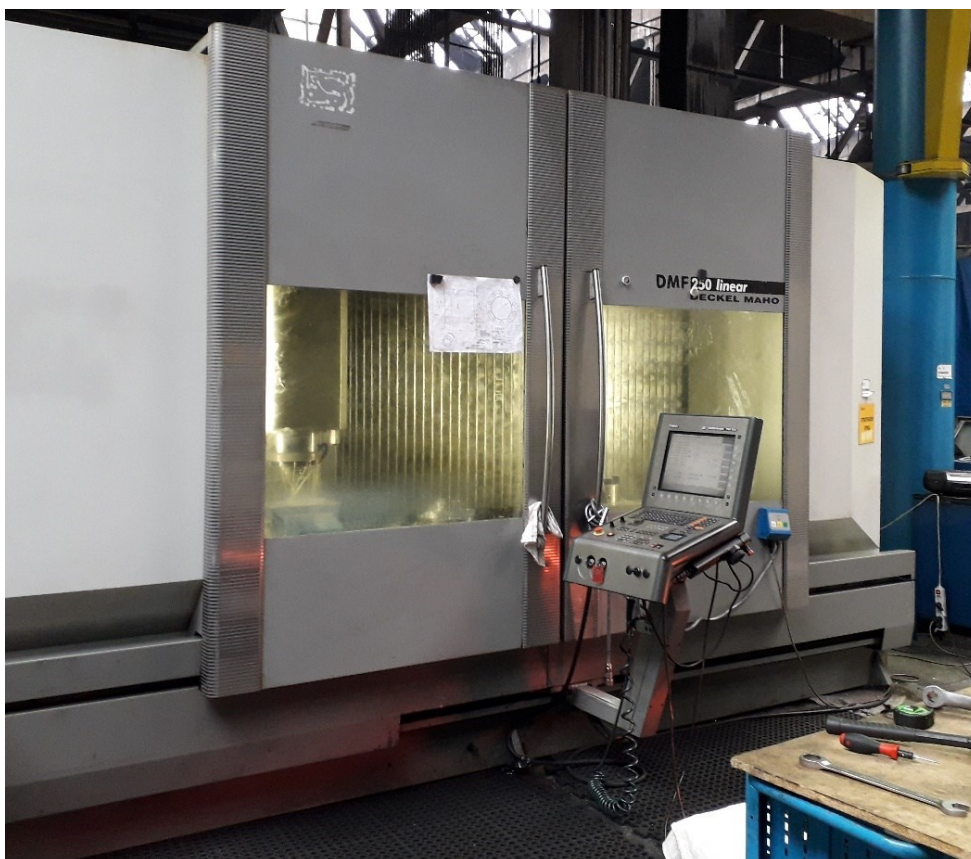


### 3.3.2 Experimentální návrh nových nástrojů

Při obrábění tvrdonávarů jsme ve firmě UNEX a.s. museli změnit technologii frézování a přidat či změnit některé nástroje za produktivnější. Jedná se o nástroj potřebný pro hrubování dovařeného tvrdonávaru a změnu kulových dokončovacích fréz.

#### 1) Volba stroje a technologie

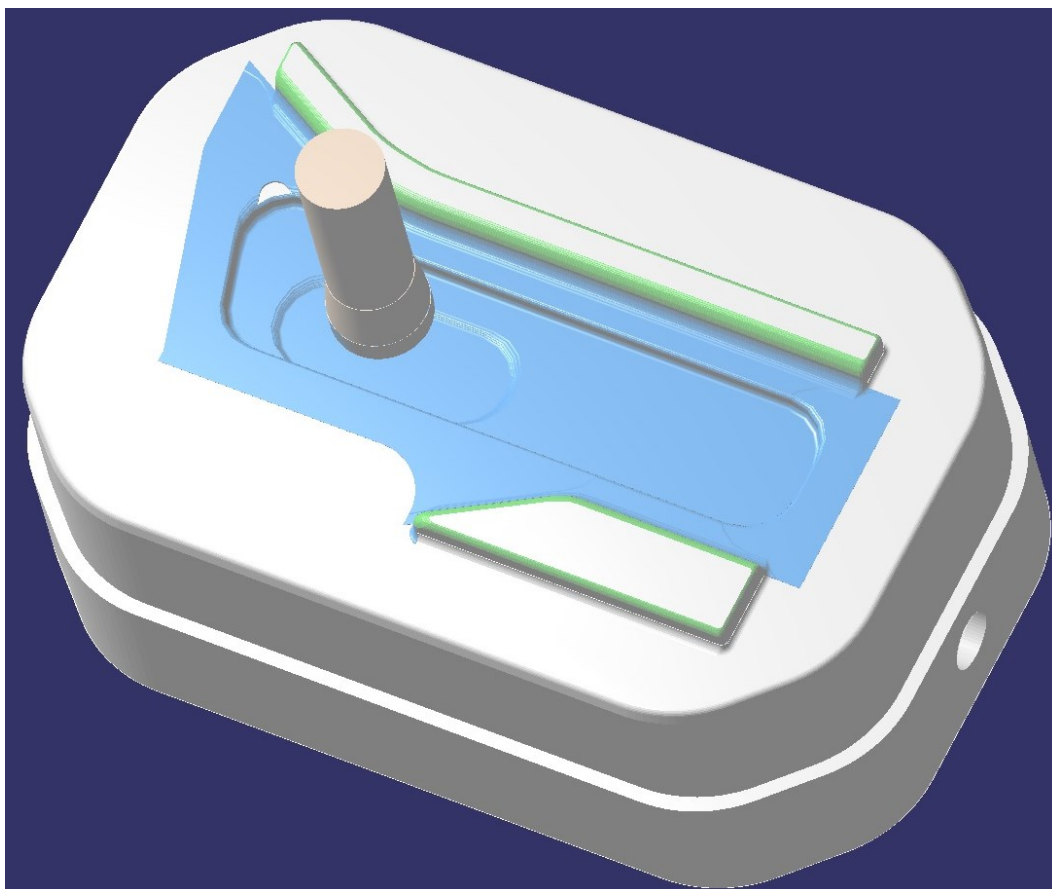
Jako metoda hrubování dovařeného návaru bylo zvoleno tzv. „suché obrábění“. K odstraňování třísek z místa řezu a obrobené plochy se začalo používat „chlazení vzduchem“. Nepoužívání chladících kapalin zamezuje teplotním šokům na povlak nástroje, tím zamezuje jeho popraskání a zvyšuje tak životnost nástroje. Z důvodu používání ofuku vzduchem nelze používat stroj DMC 64 V Linear, ale pouze stroj DMF 250 Linear. Parametry těchto strojů jsou uvedeny v *Tabulka 9 - Parametry stroje DMC 64 V Linear a DMF 250 Linear*.



*Obr. 18 – stroj DMF 250 Linear firmy UNEX a.s.*

## 2) Návrh nástroje pro hrubování návaru

Jedná se o hrubování asi 3 mm návaru. Místa, která jsou hrubována jsou viditelná z přiloženém obrázku níže:



*Obr. 19 – hrubování tvrdonávaru*

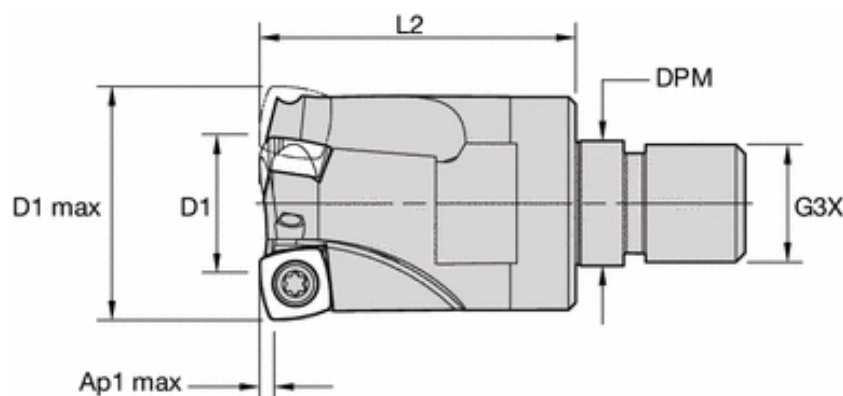
Pro hrubování tvrdonávaru Capilla 66 byly na základě doporučení dodavatele nástrojů vytypovány dva nástroje od firmy Kennametal a jeden nástroj od firmy Kyocera. Ve všech 3 případech se jedná se o modulární frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami určené pro vysokoposuvové frézování – HFC.

### **Varianta č. 1 – Kennametal D35:**

Variantou č. 1 je použití modulární hlavy se závitovou stopkou M16 od firmy Kennametal. Konkrétně typ řady 7792VXD09 (kat.č.: 7792VXD09SA035Z4R43). Jedná se o frézu s vysokými posuvy s ultra jemnou roztečí o  $D = 35$  mm. Lze používat i pro obrábění žáruvzdorných slitin. Má pozitivní geometrii pro nižší řezné síly s velkým vyložení. Zajišťuje též vyšší tuhost a stabilitu vřetene. Nástroj je určený pro rovinné frézování a frézování hlubokých kapes. [30]

Tabulka 10 - Parametry frézovací hlavy 7792VXD09SA035Z4R43 [30]

Frézovací hlava 7792VXD09SA035Z4R43							
parametr	D1 max.	D1	L2	G3X	DPM	A <sub>p1</sub> max.	Z
hodnota	35	22	43	M16	17	1,5	4



Obr. 20 – konstrukce frézovací hlavy 7792VXD09 [30]

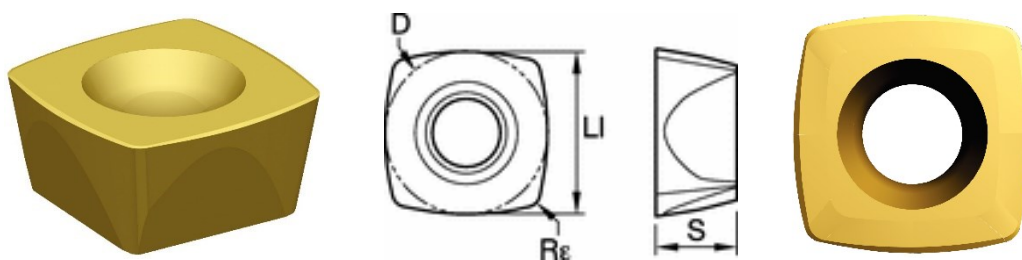
Jako VBD byly použity destičky ze slinutého karbidu od již zmíněné firmy Kennmetal. Jejich katalogové číslo je XDPW090412SRD–KC510M. Jedná se o technologii vysoce rychlostního frézování HFC. Z toho důvodu je u VBD přikládána důležitost kromě dobré otěruvzdornosti a tvrdosti i houževnatosti. A to z důvodu, aby nedocházelo k odštěpování řezné hrany či úplného praskání VBD.

Povlak KC510M má TiAlN složení a je vytvořen metodou PVD. Vyniká zejména vysokou odolností proti opotřebení. Je vhodný pro obrábění ocelí, hliníku a žáruvzdorných slitin.

Tabulka 11 – parametry VBD XDPW090412SRD–KC510M [30]

VBD XDPW090412SRD–KC510M							
parametr	sorta	D	LI	S	Rε	hm	RT
hodnota	KC510M	9,52	9,52	4,76	1,2	0,1	2,27





Obr. 21 – konstrukce VBD XDPW090412SRD [30]

## Varianta č. 2 – Kennametal D42:

Jako druhá varianta byla navržena stejná frézovací hlava řady 7792VXD09, ale o  $D = 42$  mm a s 5 efektivními břitzy nástroje (fréza je osázena 5 VBD). Tyto destičky (konkrétně XDLW090408SRD) mají jinou geometrii a povlak – X400.

Tabulka 12 - Parametry frézovací hlavy 7792VXD09SA042Z5R43 [30]

Frézovací hlava 7792VXD09SA042Z5R43							
parametr	D1 max.	D1	L2	G3X	DPM	A <sub>p1</sub> max.	Z
hodnota	42	29	43	M16	17	1,5	5



Obr. 22 – Model frézovací hlavy řady 7792VXD09 [30]

Tabulka 13 - Parametry VBD XDLW090408SRD–X400

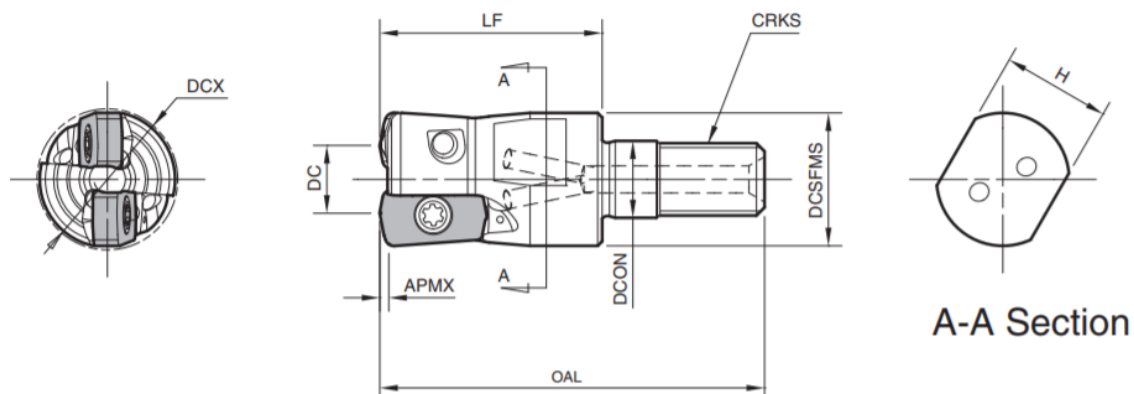
Parametry VBD XDLW090408SRD–X400							
parametr	sorta	D	LI	S	Rε	hm	RT
hodnota	X400	9,53	9,53	4,76	0,8	0,05	2,01

### Varianta č. 3 – Kyocera D32:

Poslední navržená varianta byla zvolena od našeho dodavatele nástrojů z firmy Grumant. V součinnosti s jejich obchodníkem byla navržena modulární fréza se závitem M16 o  $D = 32$  mm řady MFH Mini. Stejně jako u předchozích modulárních fréz se jedná o vysokoposuvovou frézu. Katalogové číslo je MFH 32-M16-03-5T.

Tabulka 14 - Parametry frézovací hlavy MFH 32-M16-03-5T [31]

Frézovací hlava MFH 32-M16-03-5T							
parametr	DXC	DC	OAL	LF	CRKS	$A_{p \max.}$	Z
hodnota	32	24	63	70	M16	1	5

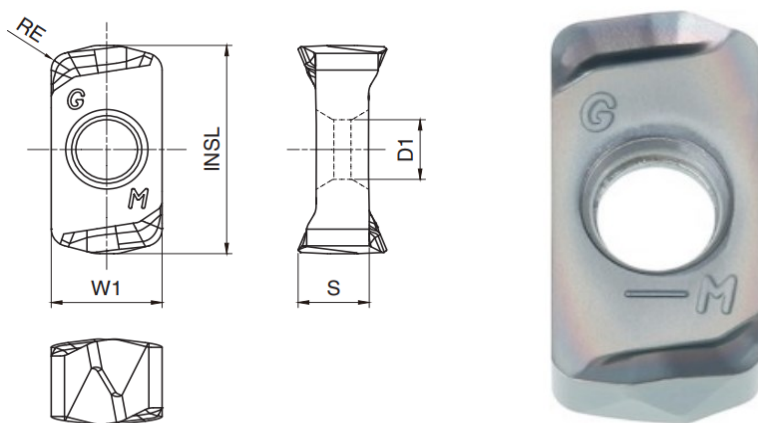


Obr. 23 – Konstrukce frézovací hlavy řady MFH 32-M16-03-5T [31]

Jako VBD byly zvoleny destičky Kyocera, katalogové číslo LOGU030310ER-GM PR1525. Tyto destičky mají oboustranné řezné hrany (celkem tedy 4) a vynikají měkkým vstupem řezné hrany do materiálu.

Tabulka 15 - Parametry VBD LOGU030310ER-GM PR1525

Parametry VBD LOGU030310ER-GM PR1525						
parametr	sorta	W1	S	D1	INSL	RE
hodnota	PR1525	6,2	3,96	3,45	11,9	1,0



Obr. 24 –Konstrukce VBD LOGU030310ER-GM PR1525 [31]

### Provedení experimentu hrubování tvrdonávaru:

Při experimentu byly všechny 3 výše zmíněné nástroje vyzkoušeny a vyhodnoceny na reálné zápusce s podnikovým číslem MZ5412040 na skutečné operaci frézování tvrdonávaru. Jako kritérium byla zvolena trvanlivost břitu jedné řezné hrany nástroje  $T = 20$  minut. Po tento čas byl každý nástroj vystaven přerušovanému řezu při následujících řezných podmínkách:

Tabulka 16 - Řezné podmínky pro experiment

Řezné podmínky pro testování nástrojů					
parametr	$v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	$f_z$ [mm]	$a_p$ [mm]	$a_e$ [%]	chlazení
hodnota	70	0,3	0,3	50	vzduchem



Obr. 24 – vyhrubovaný tvrdonávar při experimentu

Byly vyzkoušeny celkem 3 řezné hrany každého nástroje. Po čase  $T = 20$  minut bylo vizuálně vyhodnoceno opotřebení přímé části ostří  $VB_B$ , šířka žlábků na čele KB a dosažená drsnost obrobeneho povrchu. Stejně tak byla pozornost věnována už průběhu samotného frézování se zaměřením na hluchost a vibrace řezného procesu. Pokud vzniklo pouze optimální opotřebení nástroje ve formě výmolu na čele nebo opotřebení hřbetu, pokračuje se v testu dále až do opotřebení ostří  $VB_B$  odpovídajícímu zhruba 0,3 mm nebo vzniku nepřijatelného poškození jako je lom břitu nebo příliš velký nárůstek. Vyhodnocení testů je možné vidět v následující tabulce 17:

*Tabulka 17 – Vyhodnocení experimentu pro hrubování tvrdonávaru*

<b>Vyhodnocení experimentu pro hrubování tvrdonávaru</b>			
<b>Nástroj č.</b>	1	2	3
<b>identifikace</b>	Kennametal D35	Kennametal D42	Kyocera D32
<b>Počet. zubů</b>	4	5	5
<b>Cena VBD [ks]</b>	225	205	185
<b>Q [cm<sup>3</sup>.mm<sup>-1</sup>]</b>	4,01	4,01	4,01
<b>Test 1 [min]</b>	23	12*	32
<b>Test 2 [min]</b>	18,5*	9,5*	26
<b>Test 3 [min]</b>	25	20	28
<b>Pr. testů [min]</b>	22,2	13,8	28,7

\*Pozn.: U testů s hvězdičkou došlo k nepřijatelnému poškození břitu (lom, vyštipnutí atd.).  
fotky těchto poškození jsou vidět na obrázku 25.

#### **Vyhodnocení experimentu [4]:**

Výpočet otáček vřetene  $n$ :

$$n_1 = \frac{v_c \cdot 1000}{D \cdot \pi} = \frac{70 \cdot 1000}{35 \cdot \pi} = 636,6 \text{ min}^{-1} \quad (1)$$

$$n_2 = \frac{v_c \cdot 1000}{D \cdot \pi} = \frac{70 \cdot 1000}{42 \cdot \pi} = 530,5 \text{ min}^{-1} \quad (2)$$

$$n_3 = \frac{v_c \cdot 1000}{D \cdot \pi} = \frac{70 \cdot 1000}{32 \cdot \pi} = 696,3 \text{ min}^{-1} \quad (3)$$

Kde:

$v_c$  – řezná rychlost [ $m \cdot min^{-1}$ ]

$D$  – průměr frézy [ $mm$ ]

Výpočet velikosti posuvu  $v_f$ :

$$v_{f1} = f_z \cdot z_{eff} \cdot n = 0,3 \cdot 4 \cdot 636,6 = 763,9 \text{ mm} \cdot min^{-1} \quad (4)$$

$$v_{f2} = f_z \cdot z_{eff} \cdot n = 0,3 \cdot 4 \cdot 530,5 = 636,6 \text{ mm} \cdot min^{-1} \quad (5)$$

$$v_{f3} = f_z \cdot z_{eff} \cdot n = 0,3 \cdot 4 \cdot 696,3 = 835,56 \text{ mm} \cdot min^{-1} \quad (6)$$

Kde:

$f_z$  – posuv na zub [ $mm$ ]

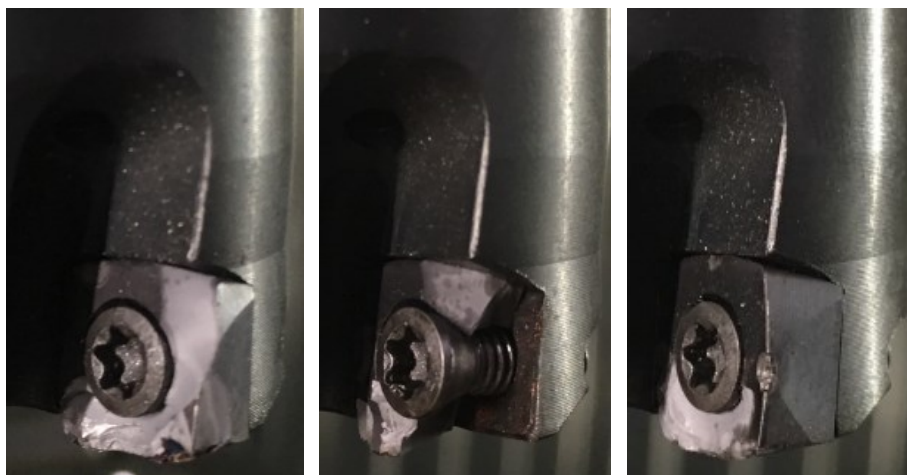
$z_{eff}$  – počet efektivních břitů na nástroji

Výpočet velikosti úběru materiálu  $Q$ :

$$Q_1 = \frac{a_e \cdot a_p \cdot v_f}{1000} = \frac{17,5 \cdot 0,3 \cdot 763,9}{1000} = 4,01 \text{ cm}^3 \cdot min^{-1} \quad (7)$$

$$Q_1 = \frac{a_e \cdot a_p \cdot v_f}{1000} = \frac{21 \cdot 0,3 \cdot 636,6}{1000} = 4,01 \text{ cm}^3 \cdot min^{-1} \quad (8)$$

$$Q_1 = \frac{a_e \cdot a_p \cdot v_f}{1000} = \frac{16 \cdot 0,3 \cdot 835,56}{1000} = 4,01 \text{ cm}^3 \cdot min^{-1} \quad (9)$$



Obr. 25 – nepřípustná poškození VBD vzniklá při experimentu

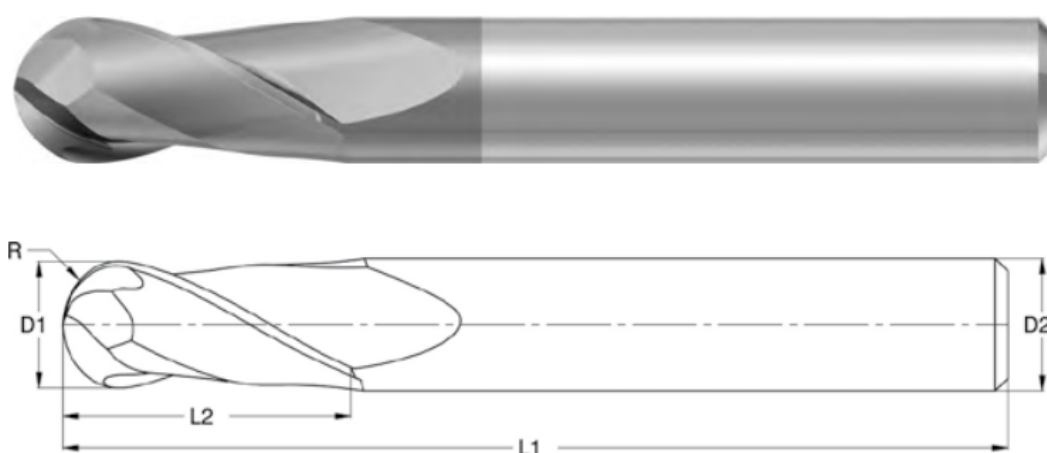
Výpočtem došlo k prokázání, že za stejný čas je odfrézováno stejné množství materiálu i přesto, že se liší průměry fréz. Z toho důvodu je pro určená nejvhodnější modulární frézy a VBD možné vyvodit závěry pouze na základě ceny a výkonu v řezu. Varianta č. 2 se prokázala naprosto nevhodná, když ze 3 pokusů dosáhla pouze 1x stanové trvanlivosti  $T = 20$  minut. U nástroje č. 1 se již dosáhlo lepších výsledků, ale v jednom případě došlo také k vyštípnutí části břitu. Nejlepšího výsledku se tedy dosáhlo u nástroje č. 3 od firmy Kyocera, který vydržel stabilně v řezu v průměru 28,7 min.

### 3) Návrh optimalizace dokončovacích kulových fréz

Stávající frézy, které se používají pro snižování kalených zápustek o 5 mm nejsou nejvhodnější i pro frézování tvrdonávarů. V současnosti používané dokončovací kulové frézy o  $D = 8$  mm a  $D = 6$  mm jsou od firmy TGS. Konkrétně jde o dvoubřité dokončovací frézy F8250. Tyto frézy jsou vhodné pro kalené oceli do 62 HRC. Doporučená aplikace je pro frézování ploch, které budou ještě ručně začišťovány. [32]

Tabulka 18 – Parametry kulových dokončovacích fréz TGS [32]

Parametry kulových dokončovacích fréz TGS						
parametr	typ	D1	D2	L1	L2	Z
hodnota	F8250.6.V6.57.12.Z2	6	6	57	12	2
hodnota	F8250.8.V8.63.16.Z2	8	8	63	16	2

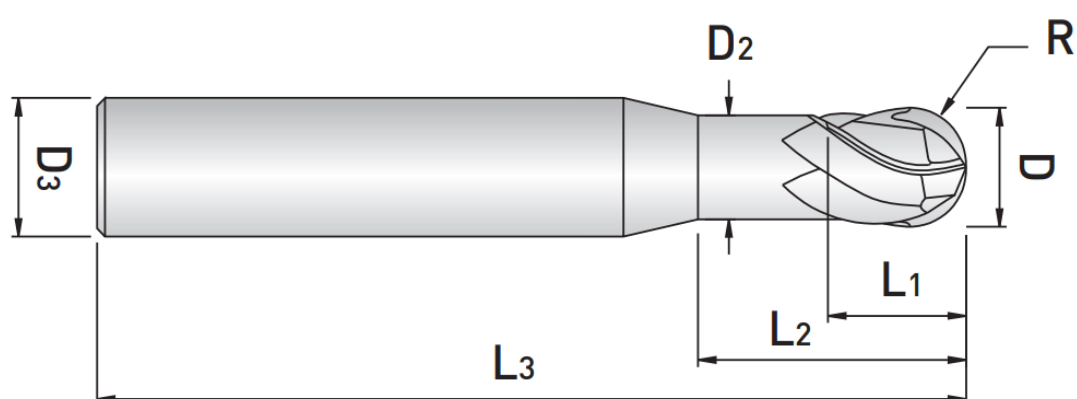


Obr. 26 – kulová dokončovací fréza TGS [32]

Nově navržené dokončovací frézy jsou od firmy Widin. Jde o špičkové dokončovací frézy určené pro velmi tvrdých materiálů do tvrdosti 70 HRC. Vhodné jsou pro suché frézování a metodu HSC. Dosahují vyšších řezných podmínek, jak dokazuje tabulka 20.

Tabulka 19 – Parametry kulových fréz Widin [33]

Parametry kulových fréz Widin								
parametr	typ	D	R	L1	L2	L3	D2	D3
hodnota	DB703060	6	3	7	12	60	5,6	6
hodnota	DB703080	8	4	9	15	70	7,4	8



Obr. 27 – kulová dokončovací fréza Widin

Tabulka 20 – Porovnání kulových fréz TGS a Widin

Srovnání kulových fréz TGS a Widin			
parametr	typ	n [min <sup>-1</sup> ]	v <sub>f</sub> [mm.min <sup>-1</sup> ]
hodnota	F8250.6.V6.57.12.Z2	7962	1354
hodnota	F8250.8.V8.63.16.Z2	5971	1075
hodnota	DB703060	8000	1750
hodnota	DB703080	6500	1550

Jak lze vidět z příložené tabulky srovnání, kulové dokončovací frézy mají podobné otáčky, ale frézy od Widinu mají daleko lepší velikost posuvu v<sub>f</sub>. V obou případech (u D6 i D8) převyšují frézy od TGS o cca 400 – 500 mm.min<sup>-1</sup>. Tyto frézy jsou tedy daleko výkonnější a u sledování opotřebení ve firmě UNEX a.s. došlo k zjištění, že frézy od výrobce Widin vydrží v řezu asi o 30% déle.

### **3.3.3 Návrh nové technologie obnovy zápustek**

Na základě skutečností zjištěných v předchozích kapitolách navrhuji následující technologii výroby pro obnovu spodní zápustky 2. operace podnikového čísla MZ5412040. Jde o suché obrábění na stroji DMF 250 Linear za použití nástrojů z původní technologie obnovy snížením, ale i nově navrženými.


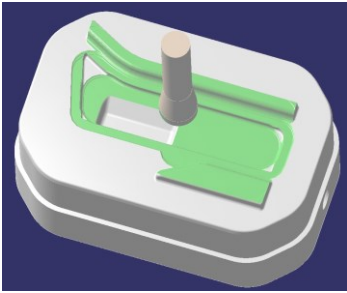
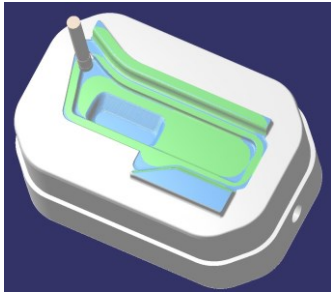
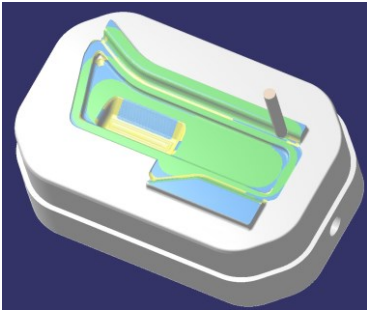
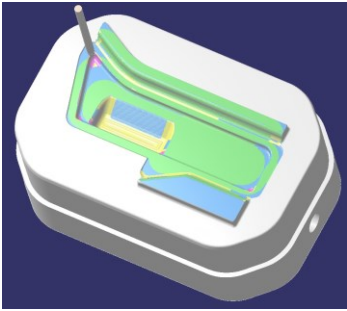
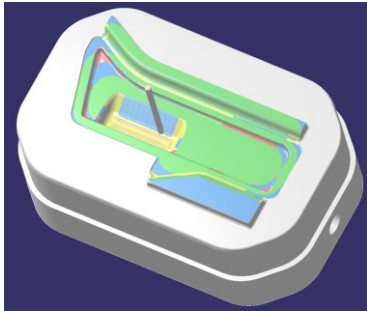
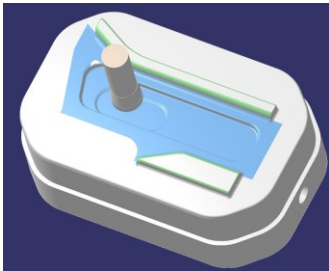
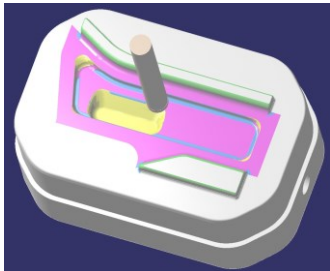
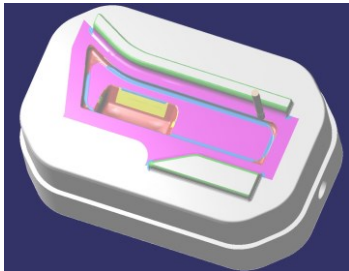
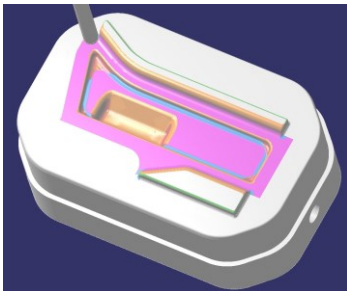
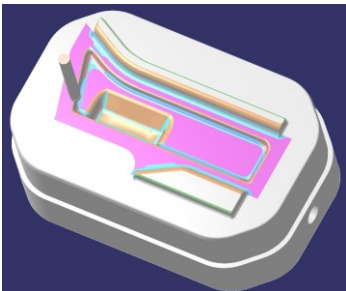
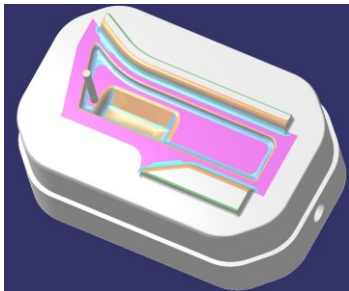
Pro názornost je ke každému úseku přidána fotka z CAM programu s vygenerovanými dráhami. Program byl vytvořen v programu Catia V5.



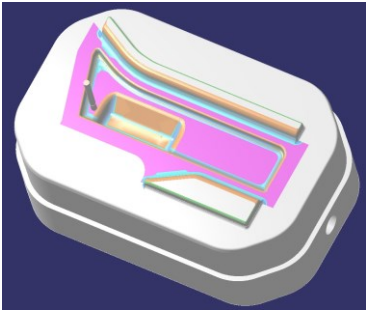
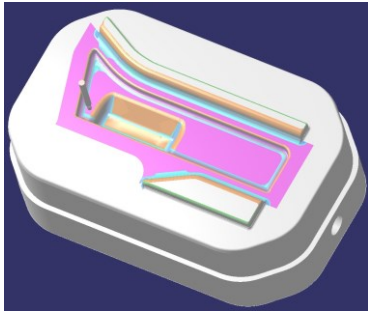
Tabulka 21 – PP nové technologie frézování opravy zápustek

<b>Č.op: 1</b>	<b>Pracoviště: 2637</b>	<b>Stroj: DMF250</b>	<b>Technologie: obrábění</b>				
<b>Název: spodek 2. operace</b>		<b>Č.v.:109716</b>	<b>Materiál: tvrdonávar</b>				
<b>Datum: 30.4.2019</b>		<b>Index:</b>	<b>Vypracoval: Ledvina</b>				
Č. úseku	Popis operace	Strana: 1/1	Řezné podmínky				
	nástroj	$v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	$f_z$ [mm]	$a_e$ [%]	$a_p$ [mm]	$z_{eff}$	$T_{As}$ [hod]
05	Snížit zápustku z čela + nahrubo tvar o 5 mm.						
	Fr. Korloy Ø 40	113	0,7	70	0,4	4	0,28
10	Snížit zbytek tvaru o 5 mm včetně kapsy.						
	Fr. Pramet Ø 16	100	0,25	50	0,2	2	0,5
15	Dokončovací frézování rádiusů vnějšího tvaru.						
	Kul. fr. YG Ø 12	140	0,11	20	0,4	2	0,13
20	Dokončovací frézování rádiusů vnitřního tvaru.						
	Kul. fr. YG Ø 8	120	0,06	20	0,2	2	0,15
25	Dokončovací frézování rádiusů vnitřního tvaru.						
	Kul. fr. YG Ø 6	105	0,05	20	0,15	2	1,35
30	Navaření návaru Capilla 66						
35	Hrubování tvrdonávaru						
	Fr. Kyocera Ø 32	80	0,4	50	0,3	5	0,7
40	Dokončovací hrubování tvrdonávaru včetně kapsy.						
	Fr. Innotool Ø 24	50	0,23	40	0,4	2	0,75
45	Dokončování vnějších rádiusů a kapsy.						
	Kul. fr. TGS Ø 8	120	0,06	20	0,2	2	0,5
50	Dokončovací frézování rádiusů vnitřního tvaru.						
	Kul. fr. YG Ø 16	80	0,2	2,5	0,4	2	1,4
55	Dokončovací frézování rádiusů vnitřního tvaru.						
	Kul. fr. YG Ø 12	80	0,15	2	0,24	2	0,67
60	Dokončovací frézování rádiusů vnitřního tvaru.						
	Kul. fr. Widin Ø 8	163	0,12	2	0,16	2	0,35
65	Dokončovací frézování rádiusů vnitřního tvaru.						
	Kul. fr. Widin Ø 6	151	0,11	2	0,12	2	0,25
70	Dokončovací frézování rádiusů vnitřního tvaru.						
	Kul. fr. TGS Ø 4	123	0,075	2	0,08	2	0,46

Tabulka 22 – PP nové technologie opravy zápustek (simulace z CAM)

Č.op: 1	Pracoviště: 2637	Stroj: DMF250	Technologie: obrábění
Název: spodek 2. operace	Č.v.:109716	Materiál: tvrdonávar	
Datum: 30.4.2019	Strana:1/2	Vypracoval: Ledvina	
Operace č. 0	Operace č. 05	Operace č. 10	
			
Operace č. 15	Operace č. 20	Operace č. 25	
			
Operace č. 35 (1. po návaru)	Operace č. 40	Operace č. 45	
			
Operace č. 50	Operace č. 55	Operace č. 60	
			

Tabulka 23 – nové technologie opravy zápustek (simulace z CAM)

<b>Č.op: 1</b>	<b>Pracoviště: 2637</b>	<b>Stroj: DMF250</b>	<b>Technologie: obrábění</b>
<b>Název: spodek 2. operace</b>		<b>Č.v.:</b>	<b>Materiál: tvrdonávar</b>
<b>Datum: 30.4.2019</b>		<b>Strana:2/2</b>	<b>Vypracoval: Ledvina</b>
Operace č. 65		Operace č. 70	
			

## 4 Technicko – ekonomické zhodnocení

V této části bych rád vypočítal výhodnost opravy zápustkových zařízení Capillovým tvrdonávarem oproti klasickému snižování zápustky o 5 mm přímo u již zmíněné zápustky. Roční požadavek je na dodávku 13500 ks výkovků. Pro tuto výrobní dávku budu náklady a výhodnost počítat. U každého obrábění je kromě celkového času obrábění z PP připočteno i 0,5 hod na přípravu a upnutí. U snížení o 5 mm je potřeba tento čas započítat 1x, u opravy Capillou 2x.

Tabulka 24 – Firemní sazby

Firemní sazby	
Druh práce	Cena
frézování	800 [Kč/hod]
žíhání	550 [Kč/hod]
svařování	550 [Kč/hod]
Capilla 66	700 [Kč/kg]

### 1) Cena opravy snížením o 5 mm

Životnost u snížené zápustky je 4500 ks výkovků. Poté se musí zápustka vyjmout z lisu a poslat na opravu na obrobnu. Je tedy potřeba udělat 3 opravy, aby mohlo být dosaženo výroby požadovaného počtu kusů. Náklady na 1 snížení tedy jsou:

Tabulka 25 – Náklady na opravy obnovou snížením

Náklady na opravy obnovou snížením			
Druh práce	Čas [hod.]	Sazba [Kč/hod(kg)]	Celkem [Kč]
frézování	5,73	800	4584
žíhání	0	550	0
svařování	0	550	0
Capilla 66	0	700	0
		Σ	4584
		N <sub>13500</sub>	13752 Kč

Celkové náklady na opravy pro 13500 ks tedy budou 13752 Kč.

## 2) Cena opravy dovařením tvrdonávaru

U obnovy tvrdonávarem Capilla 66 bylo výsledováno 3násobné zvýšení životnosti. Zápustky obnovené touto metodou.

Tabulka 26 – Náklady na opravy obnovou tvrdonávarem

Náklady na opravy obnovou tvrdonávarem			
Druh práce	Čas [hod(kg)]	Sazba [Kč/hod(kg)]	Celkem [Kč]
frézování	7,28	800	5824
žíhání	1	550	550
svařování	1,5	550	825
Capilla 66	1	700	700
		Σ	5024
		N <sub>13500</sub>	15072 Kč

Celkové náklady na opravy pro 13500 ks tedy budou 7899 Kč

## 3) Vyčíslení celkové úspory

Celkovou úsporu vyčísím jako rozdíl nákladů a výsledkem tedy bude úspora (zisk):

$$Z_{celk} = N_{sniz} - N_{cap} = 13752 - 7899 = 5853 \text{ Kč} \quad (10)$$

Kde:

$N_{sniz}$  – náklady na opravy snížením o 5 mm

$N_{Cap}$  – náklady na opravy navařením tvrdonávaru Capilla 66.

## **Závěr**

Tato diplomová práce se zabývala návrhem technologie obrábění kalených ocelí a tvrdonávarů. Volbu nové technologie si vyžádala změna technologie opravy zápustek na kovárně firmy UNEX a.s. Tato technologie značně zhoršila obrobitelnost, ale na druhou stranu až 3násobně zvýšila životnost nástrojů ke kování, což je výrazná změna.

Jako první jsem se zaměřil na volbu modulární frézy pro frézování hrubého a tvrdého návaru, který je nejprve potřeba vyhrubovat. K tomuto účelu nejlépe poslouží fréza osazená 5 VBD od firmy Kyocera. V další části jsem se zaměřil na volbu efektivnějších dokončovacích kulových fréz, kdy došlo k nahrazení původních od firmy TGS za výkonnější od firmy Widin. U zbývajících úsecích frézování byly použity stávající nástroje. Nová technologie tedy byla stanovena a úspěšně vyzkoušena.

V poslední části jsem provedl ekonomické zhodnocení, kde jsem došel k závěru, že u konkrétního spodního dílu zápustky dojde k úspoře 5853 Kč. Tento výpočet je však značně zjednodušený a jen pro jediný díl zápustky. V případě započítání celého kompletu a především materiálu, protože zápustka se po 5 – 7 sníženích musí vyrábět celá znovu a již nejde dále snižovat by úspora vycházela mnohonásobně vyšší.

## Použité zdroje

- [1] BUDA, Ján, Ján SOUČEK a Karol VASILKO. *Teória obrábania*. 2., preprac. vyd. Bratislava: Alfa, 1988
- [2] MIKOVEC, Miroslav. *Obrábění materiálů s velkou pevností a tvrdostí*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1982
- [3] HAVRILA, Michal. *Top trendy v obrábění*. I./VI. část, *Obrávané materiály*. Žilina: Media/ST, 2006. Stroje, materiály, technológie. ISBN 80-968954-2-7
- [4] *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972-2994-6.
- [5] *Obráběné materiály. Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>
- [6] *Korozivzdorné materiály – základní typy ocelí a doporučení pro jejich svařitelnost. Konstrukce* [online]. 2014 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/korozivzdorne-materialy-zakladni-typy-oceli-a-doporuceni-pro-jejich-svaritelnost/>
- [7] *Elektrody/tvrdonávary. CHEM-WELD* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: [https://eshop.chemweld.cz/TVRDONAVARY-c1\\_11\\_2.htm#min\\_price\\_filter=0&max\\_price\\_filter=0&show\\_centerpage\\_params\\_filter=0&selected\\_centerpage\\_param\\_filter=0&filter\\_values%5B2068017%5D%5B394228094%5D=1](https://eshop.chemweld.cz/TVRDONAVARY-c1_11_2.htm#min_price_filter=0&max_price_filter=0&show_centerpage_params_filter=0&selected_centerpage_param_filter=0&filter_values%5B2068017%5D%5B394228094%5D=1)
- [8] JURKO, Jozef, Jozef ZAJAC a Robert ČEP. *Top trendy v obrábění*. II./VI. část, *Nástrojové materiály*. Žilina: Media/ST, 2006. Stroje, materiály, technológie. ISBN 80-968954-2-7
- [9] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [10] HUMÁR, Anton. *Technologie I – Technologie obrábění - 1. část*. [online]. Studijní opory pro podporu samostudia v oboru „Strojní inženýrství“ na I. stupni MS studijního programu. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003, Dostupné z [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf).
- [11] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [12] CAMPBELL, F. C. *Metals fabrication: understanding the basics*. Materials Park, Ohio: ASM International, [2013]. ISBN 978-1-62708-018-7.

- [13] LOW, It-Meng. *Advances in ceramic matrix composites*. Second edition. Duxford, United Kingdom: Woodhead Publishing, an imprint of Elsevier, [2018]. Woodhead Publishing series in composites science and engineering. ISBN 978-0-08-102166-8.
- [14] KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.
- [15] Machinery's Handbook, 30th. Edition: Erik Oberg, Franklin Jones, Holbrook Horton, Henry Ryffel, Christopher McCauley. Hardcover, 2016. 978-0-8311-3097-8
- [16] BOLJANOVIC, Vukota. Metal shaping processes: casting and molding, particulate processing, deformation processes, and metal removal. New York: Industrial Press, c2010. ISBN 978-0-8311-3380-1.
- [17] *Proces obrábění kovů – životnost nástrojů. MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-proces-obrabeni-kovu-zivotnost-nastroju.html>
- [18] *Postup při frézování různých typů materiálů: Candvik Coromant* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/milling-different-materials.aspx>
- [19] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [20] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Marek SADÍLEK, Lenka PETŘKOVSKÁ a Jana NOVÁKOVÁ. *Nové směry v progresivním obrábění* [CD-ROM]. Ostrava: VŠB-TUO, 2007. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [21] VASILKO, Karol. *Top trendy v obrábání*. III./VI. část, Technológia obrábania. Žilina: Media/ST, 2006. Stroje, materiály, technológie. ISBN 80-968954-2-7.
- [22] *Hloubení dutin zápuštěk a forem. ELUC* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1401>
- [23] *Profil společnosti. UNEX a.s.* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.unex.cz/cs/o-spolecnosti/profil-spolecnosti>
- [24] DELGADO SOBRINO, D R., VELÍŠEK, K. *Novel Trends in Production Devices and Systems IV (NTPDS IV)*. Zurich: Trans Tech Publications, 2018. ISBN 978-3-0357-1265-0.
- [25] *Materiálové listy: Bohdan Bolzano* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/nastrojove-oceli/nastrojove-oceli-pro-praci-za-tepla/materialove-listy/materialovy-list-oceli-55nicrmov7>



- [26] *Obráběcí centra – vertikální: Exapro* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.exapro.cz/vertikalni-obrabeci-centrum-dmg-dmc-64-v-linear-p31114025/#prettyPhoto>
- [27] *Obráběcí centra – horizontální: Exapro* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.exapro.cz/obrabeci-centrum-horizontalni-deckel-maho-dmf-250-linear-p60926033/>
- [28] Elektrody návarové pro opravy a renovace. *Weldis* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: [https://www.weldis.cz/resources/products\\_documents/1459425351\\_ok-wearrode-40.pdf](https://www.weldis.cz/resources/products_documents/1459425351_ok-wearrode-40.pdf)
- [29] Part Catalogue. *Capilla* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: [https://www.capilla-gmbh.com/wp-content/uploads/Katalog\\_04\\_en.pdf](https://www.capilla-gmbh.com/wp-content/uploads/Katalog_04_en.pdf)
- [30] Produkty: Frézování. *Kennametal* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.kennametal.com/cs/products/20478624/57493250/556247/46066319/100048407/100048410/100048412/100035160.html?orderNumber=6024363>
- [31] Products: Cutting tools. *Kyocera* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://asia.kyocera.com/products/cuttingtools/wp-content/uploads/2016/11/M.pdf>
- [32] Produkty a služby: Nástroje. *TGS* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.tgs.cz/content/fck/files/katalogy/UniCut-katalog-hypervazby.pdf>
- [33] Products: E-catalog. *Widin* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: [http://www.widinindia.com/data/2015\\_WIDIN\\_CATALOGUE.pdf](http://www.widinindia.com/data/2015_WIDIN_CATALOGUE.pdf)

## **Seznam příloh**

Příloha A – Výkres sestavy zápustkového zařízení 2. operace

Příloha B – Výkres spodní zápustky 2. operace

## **Poděkování**

Závěrem mé práce bych rád poděkoval mému vedoucímu panu Ing. Tomášovi Zlámalovi, Ph.D. za jeho trpělivost a shovívavost při vypracování mé práce a také všem, kteří mě během mého studia něco naučili.